

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria Elèctrica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Tesi Doctoral

Electricitat i foc: aportacions experimentals d'aplicació docent

Tesi presentada per obtenir el
títol de Doctor per la Universitat
Politécnica de Catalunya (UPC)
Dins el programa de doctorat en
Enginyeria Elèctrica

Autor: Marc Martí Tous

Director: Dr. Ricard Bosch Tous

Barcelona, juliol de 2015

Capítol 3. Experiments de descàrrega elèctrica en un gas en corrent altern en presència de foc

3.1 Introducció

3.1.1 Antecedents

L'any 2003 el Dr. Ricard Bosch va participar en el peritatge d'un incendi relacionat amb una fàbrica de grans peces de polièster i fibra de vidre [103]. Hi havia peces emmagatzemades al costat de la indústria, just a sota d'un vano de 300m de longitud d'una línia aèria d'alta tensió de 110kV. Es va registrar un dispar de proteccions per la circulació d'un corrent de defecte a terra alimentat per les seves dues entrades. Es van produir dos registres de corrent de defecte, un de 5kA i un altre indeterminat. Es pot afirmar que com a mínim van circular 5kA. En l'anàlisi forense dels conductors, no es van trobar mossegades associades a l'arc. Haurien estat característiques de corrents de defecte d'aquest ordre de magnitud. Això va suggerir que s'havien produït descàrregues que no van erosionar la superfície del conductor.

Els arcs poden ser causa o conseqüència del foc. L'origen dels arcs que es produeixen durant un incendi, pot ser rellevant a l'hora de dirimir responsabilitats civils o penals. Existeix la possibilitat que un defecte a la línia aèria, provoqués una descàrrega elèctrica responsable de la ignició de les peces. O bé, el defecte hauria pogut produir espurnes que al caure provoquessin la seva ignició.

No obstant, l'incendi també podria haver començat per una causa aliena a la línia. Les descàrregues serien conseqüència del foc. Tot i així, existiria la possibilitat que els efectes de les descàrregues no relacionades amb l'origen de l'incendi, haguessin contribuït a propagar-lo.

La ionització de l'aire produïda pel foc i les partícules conductores que poden ser emeses durant la combustió, entre d'altres factors, provoquen una disminució de la seva rigidesa dielèctrica. La tensió disruptiva necessària per produir una descàrrega a través d'una determinada distància disminueix. Aquest fet pot ocasionar que unes distàncies de seguretat, que en condicions normals eviten que es produeixin descàrregues disruptives, en condicions de foc deixin de ser segures.

Per il·lustrar aquesta problemàtica d'arcs que són víctimes del foc, durant el judici associat al sinistre, el Dr. Ricard Bosch va idear un experiment de laboratori electrotècnic d'alta tensió.

Entre les demostracions didàctiques que es realitzen a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB (UPC), es troba l'experiment de l'explosor de banyes o l'escala de Jacob⁴⁴ (v. Fig.3.1 (a)). Una de les varetes es connecta a una font d'alta tensió a freqüència industrial i l'altre a la presa de terra. La geometria de les varetes en forma de V truncada i l'espira que descriuen els cables de connexió, fan que l'arc

⁴⁴ En l'àmbit dels experiments de laboratori de física acostuma a anomenar-se d'aquesta forma. És un experiment antic que sembla tenir un origen desconegut. El terme sembla fer referència a l'escala que apareix al passatge bíblic del Somni de Jacob, a través de la que els àngels pugen al cel. En algunes versions de l'experiment, es col·loca un tercer elèctrode curt entre les dues banyes per iniciar l'arc. Popularment s'anomena de Gabriel. Podria fer referència a l'arcàngel Gabriel.

tingui tendència a desplaçar-se cap amunt, allunyant-se de la font d'alimentació. Al descriure aquesta trajectòria l'arc es va allargant, de forma que facilita la desionització. Arriba un punt en el que la tensió no és suficientment elevada per mantenir estable un arc de tanta longitud i l'arc s'extingeix.

Per exemple, aquest tipus d'explosor és utilitzat en les catenàries ferroviàries i algunes línies aèries de AT, com element de protecció davant de sobretensions transitòries produïdes per llamps o maniobres a la xarxa. Actualment s'han anat substituint per parallamps, perquè tenen un comportament menys sensible a la variació de les condicions atmosfèriques, entre d'altres factors.

L'experiment dissenyat consisteix en realitzar una variació de l'experiment de l'explosor de banyes. S'encén una espelma de cera de parafina just a sota dels elèctrodes de l'explosor (v. Fig.3.1(b)). La flama produeix una disminució significativa de la tensió disruptiva necessària perquè es produeixi una descàrrega. L'any 2010, durant l'elaboració del projecte d'aquesta tesi, es va decidir registrar i analitzar l'experiment; i desenvolupar derivades del mateix.

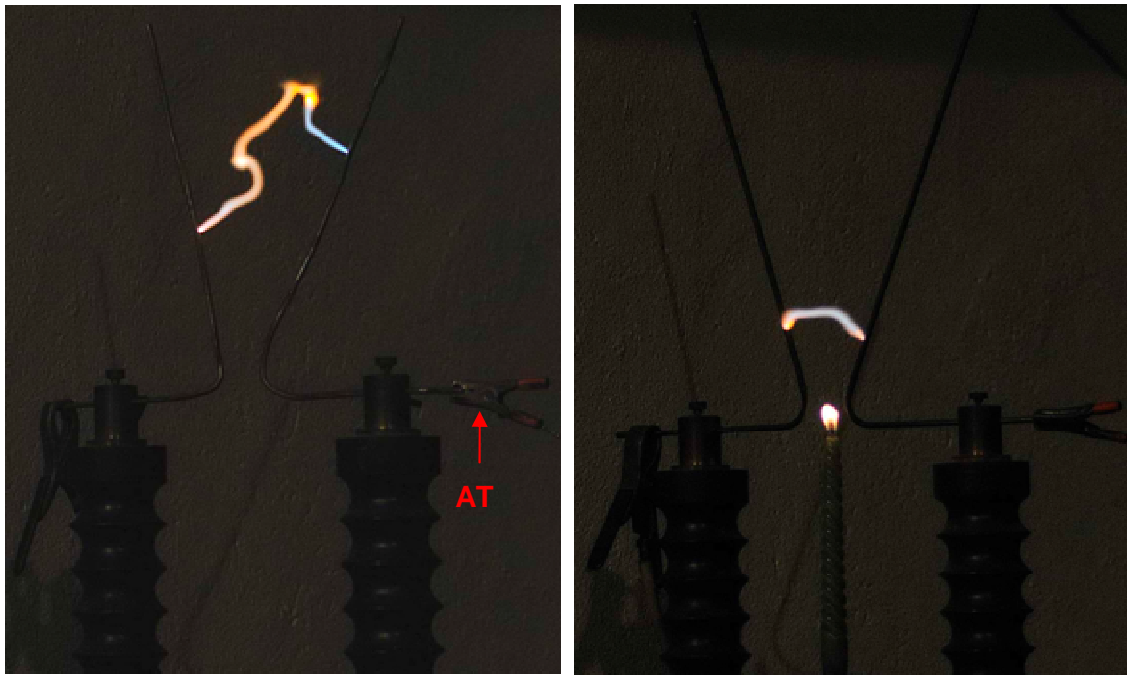


Fig.3.1 (a) Experiment de l'explosor de banyes. (b) Experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma. (A.f. Martí, M.).

Durant la recerca bibliogràfica, es va detectar l'existència d'alguns estudis experimentals, dos d'ells publicats a IEEE (Fonseca, et al. [104] i Robledo-Martínez, et al. [105]), que tracten sobre els efectes de la disminució de la rigidesa de l'aire en presència de foc, en línies aèries d'alta tensió de transport. Un cop finalitzada la fase experimental de la tesi, el desembre de 2014, també es va localitzar un article de recerca d'origen xinès (Pu, et al. [106]), publicat el setembre de 2014. Tracta d'una forma experimental aquesta qüestió, en relació amb els incendis forestals que afecten, amb freqüència, les línies de transport d'alta tensió d'algunes regions de la Xina.

En aquests estudis s'observa que en funció dels combustibles involucrats, s'obtenen resultats experimentals diferents. Els valors de la reducció de la rigidesa de l'aire en presència de foc, no són coincidents. La diversitat de possibles combustibles, contaminants i tipus de vegetació diferents, implicats en els incendis d'arreu del món, fan que es pugui arribar a resultats experimentals dispars. També influeix la diferència de rangs de tensió i distàncies dielèctriques, tipologia de línies estudiades i metodologies experimentals emprades. D'altra banda, aquests estudis es centren en les línies de transport, però no en les de distribució amb nivells de tensió de MT.

En aquest capítol es pretén donar algun pas per contribuir a realitzar aportacions futures a l'estudi d'aquesta casuística en el nostre entorn. També per il·lustrar-la amb experiments de laboratori electrotècnic d'alta tensió, amb una finalitat d'aplicació docent.

3.1.2 Variació de la tensió de ruptura dielèctrica en presència de foc

La rigidesa dielèctrica de l'aire, en condicions normals de pressió i temperatura atmosfèrica, és de l'ordre de 3kV/mm. No obstant, diversos factors poden alterar-la.

La disminució de la pressió i l'augment de la temperatura de l'aire, disminueixen la seva rigidesa dielèctrica i les tensions disruptives associades [107]. Aquests factors modifiquen la seva densitat. Per exemple, la tensió disruptiva (U_d) entre dues esferes, separades per aire i amb un camp elèctric homogeni, varia linealment segons la Eq.3.1.

$$U_d = U_{d0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \quad (Eq. 3.1)$$

On: $P_0=1013\text{hPa}$, $T_0=293\text{K}$. i U_{d0} és la tensió disruptiva quan $P=P_0$ i $T=T_0$.

La humitat i la condensació poden dificultar la mobilitat dels electrons i augmentar la tensió disruptiva. No obstant, en condicions de foc aquest no és un factor determinant. Els corrents d'aire poden desplaçar ions i també poden dificultar el procés de descàrrega.

La geometria, contaminació i temperatura de la superfície dels elèctrodes també poden influir. Els elèctrodes poc polits i contaminats, poden dificultar que es produeixi una descàrrega. En condicions normals de temperatura, el material dels elèctrodes no influeix [108]. Per elèctrodes de níquel s'ha comprovat que la tensió disruptiva es manté pràcticament invariable fins als 1073K. Per elèctrodes de coure i alumini, a l'augmentar la seva temperatura, la tensió disruptiva augmenta [109].

En conseqüència, en un incendi a pressió atmosfèrica, és d'esperar que la tensió disruptiva disminueixi. La temperatura augmenta significativament i l'ambient s'ionitza. No obstant, la variació de la densitat de l'aire expressada en la Eq.3.1, no explica els resultats experimentals obtinguts en presència de foc. Per exemple, Robledo-Martínez, et al. [105], estudia la variació de la tensió disruptiva en un model de línia aèria de 70kV, quan es sotmesa a flames procedents de la combustió de gas. Per separacions entre conductors inferiors a 3cm troba reduccions de l'ordre del 50%. No obstant, per separacions superiors a 20cm, troba reduccions de l'ordre del 75%. Altres

autors estableixen valors diferents utilitzant altres nivells de tensió o combustibles. La variació de la densitat de l'aire, en funció de T i P, per si sola, no explica aquestes divergències.

Les partícules conductores (p.e. les carbonoses) procedents de la combustió, presents a les flames i als fums, augmenten la conductivitat del medi. Es poden entendre com baules de cadenes que poden formar camins conductors que uneixin els elèctrodes. Aquests camins curtcircuiten l'espai que separa els elèctrodes, augmentant la conductivitat. Fonseca, et al. [104], estudien la disminució de la rigidesa dielèctrica de línies aèries de AT en l'àmbit d'incendis agrícoles. Conclouen que un gran nombre de partícules conductores procedents de la combustió, tenen una gran influència en la disminució de la rigidesa dielèctrica.

Les càrregues elèctriques presents a les flames alteren la conductivitat del medi. Tenen relació amb el desenvolupament dels mecanismes de descàrrega i la progressió de l'arc. La polaritat (en CC) o la variació de la polaritat (en CA) del sistema elèctric és un factor a considerar.

Aquests factors també dificulten o impossibiliten la regeneració dielèctrica de l'ambient. En CA, propicia que l'arc es mantingui encès després de l'extinció deguda als passos per zero. Contribueix a la progressió de l'arc i a un possible efecte propagador de l'incendi.

3.1.3 Descàrregues elèctriques en línies aèries d'alta tensió ocasionades pels incendis

3.1.3.1 Descripció de les descàrregues i àmbits on es manifesten

Membres de la Direcció General de Prevenció d'Extinció d'Incendis i Salvaments i del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya, han estat testimonis de descàrregues elèctriques transitòries, visibles, audibles i eventualment violentes, durant el transcurs d'incendis produïts a Catalunya. S'han vist entre les fases de línies aèries de AT o bé entre fase i terra. Les atribueixen als efectes del fum i les flames sobre les línies.

A la Xina s'ha elaborat una estadística recent, amb la complicitat de la companyia elèctrica, per valorar la incidència d'aquesta casuística en línies de transport de 220-500kV [106]. Analitza diferents regions del país durant els darrers anys. La geografia d'algunes de les seves regions, amb grans boscos travessats per línies de transport de grans longituds, afavoreix aquesta casuística. No es té constància d'un estudi públic similar al nostre entorn.

Les faltes es contenen per desenes a l'any en diverses regions. S'afirma que afecten seriosament l'estabilitat del sistema, que els seus efectes són més severs que els del llamp i tenen una major duració. Es produeixen entre fases o entre fase i terra. Coincideix amb les observacions d'altres estudis com el de Fonseca, et al. [104]. També amb les dels Bombers de la Generalitat de Catalunya, en línies de tensions nominals inferiors. Estadísticament sembla que es produeixen amb major freqüència a prop del suport. S'arriba a la conclusió que succeeixen indistintament en diferents nivells de tensió dins del rang que analitzen.

L'estudi de Fonseca, et al. [104], analitza la casuística en l'àmbit dels incendis agrícoles. En particular, dels produïts en els camps de canyes de sucre d'Amèrica. Senyala que en entorns

agrícoles aquesta problemàtica és comuna en molts països. Com a derivada, destaca el problema de dipòsit de contaminants conductors en els aïlladors de les línies després d'un incendi agrícola.

En un entorn industrial també és possible. Per exemple, en el cas de la fàbrica de peces de polièster i fibra de vidre que s'ha descrit al principi del capítol. La carbonització d'aquests materials, durant la seva combustió, va emetre flames i fums carregats de partícules conductores. És un escenari propens per una disminució significativa de la rigidesa dielèctrica de l'aire.

A la Fig.3.2 es mostra una seqüència d'imatges d'un incendi produït sota una línia d'alta tensió, a prop de la carretera "Angeles Crest Highway" (Califòrnia, EUA) [110]. Durant la progressió de l'incendi, sembla que es produeixen algunes descàrregues des de la línia en el núvol de fum. En el segon fotograma s'observa una flama que arriba a la línia. En el tercer fotograma es produeix una descàrrega i un fenomen local que recorda a una combustió sobtada generalitzada. Una descàrrega és apreciable en el quart fotograma, abans de la desaparició del fenomen en unes dècimes de segon.



Fig.3.2 Descàrrega elèctrica en una línia aèria d'alta tensió involucrada en un incendi. (A.f.d. font: [110]).

3.1.3.2 Conseqüències de les descàrregues

3.1.3.2.1 Efectes en la investigació de les causes dels incendis

Les descàrregues elèctriques ocasionades pels incendis i els seus efectes, tenen implicacions a l'hora d'investigar l'origen i propagació d'un incendi. Sovint és difícil discernir si els defectes elèctrics fóren anteriors o posteriors a l'inici del foc. És rellevant a l'hora de valorar si en van poder ser la causa o van ser una mera conseqüència.

D'altra banda, també pot ser difícil determinar la possibilitat que participessin en la propagació de l'incendi; i si ho van fer en quina mesura. Com s'ha posat de manifest en l'exemple exposat a l'apartat 3.1.2.1, té implicacions judicials quan s'han de dirimir responsabilitats penals o civils.

3.1.3.2.2 Pertorbacions i talls de subministrament d'energia elèctrica

Durant els incendis, les faltes que es produeixen en el sistema de transport i distribució de l'energia elèctrica afectats, poden comportar interrupcions del subministrament elèctric. Aquests talls poden afectar zones llunyanes en relació amb l'incendi. Mentre l'incendi no ha estat detectat o els bombers no han pogut comunicar la seva posició o progressió als responsables del sistema elèctric, es poden produir talls intempestius. Amb una xarxa poc mallada les conseqüències poden ser més severes.

A Catalunya quan es produeix una situació d'alt risc d'incendi (deguda a elevades temperatures ambientals, elevada càrrega de les línies, etc), es realitzen actuacions preventives com limitar els processos de reenganxament de les línies. Si es detecta un incendi, els bombers notifiquen als responsables del manteniment de les xarxes implicades la posició del foc i s'activa un pla específic. Mentre això no succeeix, existeix la possibilitat de talls intempestius.

Després de l'incendi, els dipòsits de partícules conductores sobre els aïlladors, procedents dels fums de la combustió, poden comportar risc de contorneig i ruptura. Un manteniment preventiu és necessari per evitar-ho.

3.1.3.2.3 Riscos pels equips d'extinció d'incendis

Les descàrregues procedents de les línies poden comportar riscos d'electrocució per les persones que treballen en l'extinció de l'incendi. Les zones amb presència de dipòsits o corrents d'aigua són especialment perilloses. La disminució dielèctrica de l'aire produïda pel foc incrementa els riscos.

A Catalunya, per evitar-ho, un cop s'ha comunicat la posició de l'incendi als responsables del manteniment de la xarxa, es realitzen maniobres per aïllar elèctricament la zona afectada. Normalment també es manté un equip al centre de comandaments per desconectar les línies que sigui necessari, en funció de la progressió del foc. Les primeres actuacions i els canvis sobtats en l'evolució de l'incendi, poden ser factors de risc.

3.1.3.2.4 Efecte propagador de l'incendi

En alguns casos, les descàrregues poden actuar com a elements propagadors del foc, generant focus secundaris. L'efecte propagador pot dependre de molts factors. Per exemple, dels combustibles que pugui haver a prop de la línia, la magnitud de l'incendi en les zones annexes al defecte, l'energia de les descàrregues i la seva velocitat de propagació, el temps d'actuació de les proteccions, l'efecte dels possibles reenganxaments, les espurnes que es puguin ejectar, etc.

En altres casos, les descàrregues poden ser relativament innòcues, en relació amb la progressió de l'incendi. Per exemple, la descàrrega que s'ha mostrat a la Fig.3.2, provoca una combustió sobtada que propaga el foc momentàniament a la línia. No obstant, poc després desapareix espontàniament. No origina focus secundaris ni participa en la progressió de l'incendi que s'està produint a baix.

3.2 Experiments de descàrrega en corrent altern en presència de foc

3.2.1 Equipament general d'assaig

Els experiments es porten a terme a la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB. S'utilitza un equipament d'assaig⁴⁵ que es basa en un transformador monofàsic d'assaig d'alta tensió ($S_N=75\text{kVA}$, $U_N=440\text{V}/300\text{kV}$, $I_N=170,5/0,25\text{A}$, $f=50\text{Hz}$ i $u_{cc}=4,8\%$). El transformador s'alimenta mitjançant un autotransformador regulable. El conjunt permet variar la tensió entre 0-300kV. Al secundari del transformador hi ha connectada una resistència limitadora del corrent de 300k Ω . La limitació del corrent facilita la visualització a ull nu de les descàrregues elèctriques. Eventualment pot ser curtcircuitada per augmentar el corrent de la descàrrega. La tensió d'assaig es pot calibrar amb un explosor d'esferes de 250mm de diàmetre. Aquests elements es mostren a la Fig.A.2 de l'annex A.

Per mesurar tensions, s'utilitza un transformador de tensió (TT) de mesura de AT. Per mesurar corrents, s'utilitza un transformador d'intensitat (TI) de mesura de AT, que es connecta a un shunt calibrat amb connector BNC. Els instruments de mesura són de classe 0,5. Les cadenes de mesura es connecten, mitjançant cables coaxials, a un oscil·loscopi digital de 200MS/s i 200MHz.

3.2.2 Experiments amb explosor de banyes en presència de flama

3.2.2.1 Introducció als experiments

Es realitzen variacions de l'experiment de generació de descàrregues elèctriques en AT entre els elèctrodes d'un explosor de banyes, afegint una flama procedent d'una espelma de parafina o una torxa de gas butà. La finalitat és observar, il·lustrar i analitzar els efectes del foc sobre els processos de descàrrega elèctrica; així com els del camp elèctric i les descàrregues sobre les flames. És una aproximació, des del laboratori electrotècnic a freqüència industrial, a les casuístiques observades quan un incendi real afecta a sistemes elèctrics de AT. Pot tenir una aplicació docent i servir per divulgar-los des d'una perspectiva empírica.

⁴⁵ L'equip procedeix d'una donació realitzada a l'ETSEIB (UPC) per la fàbrica Pirelli de Vilanova i la Geltrú, l'any 1970.

3.2.2.2 Materials i muntatge

L'explosor de banyes està format per dos elèctrodes de llautó de 5mm de diàmetre. Cadascun d'ells es fixa a un aïllador muntat sobre un suport metàl·lic orientable. La configuració geomètrica és en forma de V truncada. La separació inicial entre els elèctrodes (a), prenent com a referència el punt més baix, és ajustable. Es connecta l'elèctrode de la dreta a la font de AT (descrita a l'apartat 3.2.1) i el de l'esquerra a terra.

Per generar la flama, es col·loca una espelma de cera de parafina sobre un aïllador recolzat al suport metàl·lic. L'espelma té un diàmetre de 60mm. Es pot elevar usant uns gruixos de material aïllant calibrats. Permet ajustar la distància entre la base de la flama i el punt més baix dels elèctrodes (h). Cal tenir en compte el desplaçament de la base de la flama, ocasionat per la fusió de la cera. L'esquema del muntatge de l'experiment es mostra a la Fig.3.3 (a).

La flama que produeix l'espelma té una forma allargada. Al terç inferior de la flama, hi ha una zona fosca amb forma el·lipsoïdal. S'hi produeix piròlisi i es forma sutge [111]. Just a sobre, un cos lluminós visible de color groc-blanc. Aquesta zona és rica en partícules de carboni i té una temperatura de l'ordre de 1200°C [111]. Existeix una zona perifèrica de la flama no visible, que embolcalla la zona superior del cos groc. És molt rica en oxigen i es troba a una temperatura de l'ordre de 1400°C [111]. La part inferior de la flama es embolcallada per una zona perifèrica de color blau. Es troba a una temperatura de l'ordre de 800°C [111]. A la Fig.3.3 (b), es mostren les diferents zones de la flama. En aquesta espelma, l'altura del cos visible de la flama és de l'ordre de 24mm i l'amplada màxima de 5,7mm.

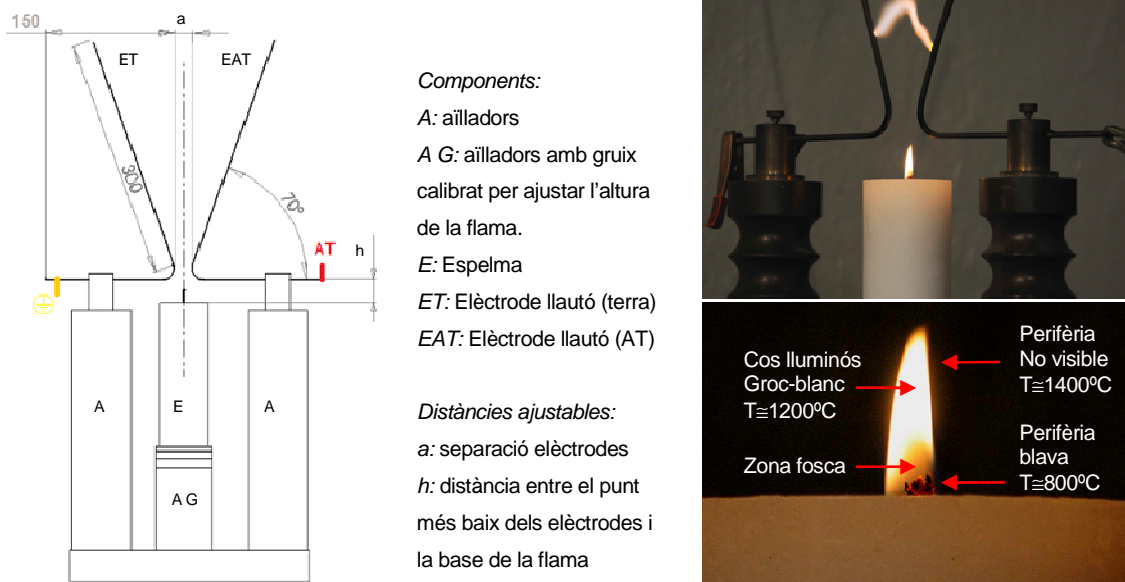


Fig.3.3 (a) Croquis de l'experiment de l'explosor de banyes amb flama. (b) Il·lustració de l'experiment i de les zones de la flama d'una espelma. (A.f. Martí, M.).

Els productes de la combustió d'una espelma de parafina són principalment aigua (H_2O) i diòxid de carboni (CO_2). No obstant, pot emetre una gran quantitat de productes addicionals. Poden procedir d'una combustió incompleta i de les impureses. Per exemple, monòxid de carboni (CO), monòxid

de nitrogen (NO), hidrocarburs policíclics aromàtics, compostos orgànics volàtils, aldehids, sutge, etc [112].

L'espelma es pot substituir per una torxa que generi altres tipus de flama. Per exemple, per una torxa de gas butà d'encesa piezoelèctrica d'ús general. El diàmetre de la flama, mesurat a la seva base, que produeix la torxa utilitzada és de 20mm. En aquest cas, l'alçada de la flama es pot ajustar amb el regulador de sortida del gas. Es poden produir descàrregues entre la boca metàl·lica de la torxa i els elèctrodes, que distorsionin l'experiment. Cal allunyar suficientment la boca; o eventualment connectar-la a terra, si es precis apropar-la per fer demostracions qualitatives.

Les flames procedents d'una torxa de gas propà o butà, quan la combustió és completa, tenen un color blavós i són estables. Quan la combustió és incompleta, tendeixen a ser turbulentes, inestables, sorolloses i els extrems tenen colors ataronjats i groguencs. La temperatura mitjana d'una flama, procedent de la combustió del propà a l'aire, és de l'ordre de 1100-1230°C; i la màxima que pot assolir de 1980°C [113]. La temperatura d'una flama difusa procedent de la combustió del butà a l'aire en una torxa, és de l'ordre de 1000-1100°C. La temperatura màxima quan la flama es generada amb premescla del butà amb oxigen, és de l'ordre de 1500°C [114].

Durant la combustió completa d'hidrocarburs, com el propà o el butà, els productes que es generen són bàsicament aigua (H_2O) i diòxid de carboni (CO_2). No obstant, com en el cas de l'espelma, poden aparèixer productes addicionals procedents d'una combustió incompleta, les impureses o un refredament violent. Per exemple, monòxid de nitrogen (NO), monòxid de carboni (CO), diòxid de sofre (SO_2), acetilè (C_2H_2), alcohols, aldehids, cetones, àcids carboxílics, sutge, etc [115].

3.2.2.3 Metodologia

3.2.2.3.1 Influència del procés de descàrrega en la forma de les flames

S'ajusta l'altura de l'espelma i la separació inicial dels elèctrodes. S'encén l'espelma i s'espera a que s'estabilitzi la flama i la temperatura. És important garantir que no existeixin corrents d'aire que distorsionin les observacions, per causes alienes als efectes d'origen elèctric.

En una primera etapa, s'aplica tensió alterna sinusoidal de $f=50\text{Hz}$ paulatinament, sense que es produeixi corona o descàrrega. Es disminueix la tensió fins a zero. Es fotografia la forma de la flama i es filma la seva evolució. Es realitzen iteracions per contrastar observacions.

En una segona etapa, s'aplica tensió alterna sinusoidal de $f=50\text{Hz}$ paulatinament, fins que es produeix una descàrrega disruptiva. S'augmenta la tensió. Les descàrregues ascendeixen per l'explosor de banyes fins que s'extingeixen. Es fotografia l'evolució de la forma de la flama. Es registren oscil·logrames de tensió i corrent.

Finalment, se substitueix l'espelma per una torxa de gas butà. S'ajusta l'alçada i potència de la flama amb el regulador de gas. Es repeteixen els procediments i la metodologia anteriors.

3.2.2.3.2 Anàlisi de la tensió disruptiva i dels oscil·logrames de l'arc amb foc

S'ajusta l'altura de l'espelma i la separació inicial dels elèctrodes.

En una primera etapa, l'espelma està apagada. S'aplica tensió alterna sinusoidal de $f=50\text{Hz}$ paulatinament, fins que es produeix una descàrrega disruptiva. Es fotografia en mode continu. Es registra la tensió disruptiva i l'oscil·lograma de tensió i corrent. Es desconnecta ràpidament la font d'alimentació. S'espera a que els elèctrodes assoleixen la temperatura ambient (es controla amb una càmera termogràfica); i a la regeneració de la rigidesa dielèctrica de l'aire. Es repeteix el procés tres vegades. Es registra com a resultat el valor mig de les tres tensions disruptives.

En una segona etapa, s'encén l'espelma i s'espera a que s'estabilitzi la flama i la temperatura. Es repeteix el procediment anterior. S'apaga l'espelma. Es realitzen iteracions amb diferents valors de separació inicial d'elèctrodes (a) i de l'altura de la base de la flama respecte els elèctrodes (h).

En una tercera etapa, s'aplica tensió alterna sinusoidal de $f=50\text{Hz}$ paulatinament, fins que es produeix una descàrrega disruptiva. Es disminueix discretament la tensió fins que s'extingeix l'arc i es manté. Es troba un interval de tensions, lleugerament inferior a la tensió disruptiva, en el que es produeixen descàrregues intermitents i conducció discontinua. Es registren oscil·logrames de tensió i corrent.

Finalment, se substitueix l'espelma per una torxa de gas butà. S'ajusta l'alçada i potència de la flama amb el regulador de gas. Es repeteixen els procediments i la metodologia anteriors per $h=25\text{mm}$ (alçades menors, eventualment produeixen descàrregues entre la boca i els elèctrodes).

3.2.2.4 Descripció, resultats i discussió

3.2.2.4.1 Influència del procés de descàrrega en la forma de les flames

3.2.2.4.1.1 Flama procedent d'una espelma de parafina

A la Fig.3.4 (a) es mostra una flama estable abans d'aplicar tensió. En aquest exemple, s'han ajustat els elèctrodes i l'altura de l'espelma, de forma que $a=30\text{mm}$ i $h=5\text{mm}$. A mesura que s'augmenta la tensió, s'observa que el cos visible de la flama es deforma progressivament. La seva geometria varia. S'aprecia un efecte similar al de la compressió d'un cos deformable. La flama s'acosta a les zones de major gradient de camp elèctric.

A la Fig.3.4 (b) es mostra l'estat de deformació màxima abans de la descàrrega (la tensió és de $U_{ef}=10\text{kV}$). L'alçada de la flama ha disminuït de 24mm a 10mm ; i la seva amplada màxima ha augmentat de $5,7\text{mm}$ a 13mm . El cos visible de la flama s'acosta alternativament a als dos elèctrodes. És un fenomen que a simple vista es percep com una certa oscil·lació de la flama.

Si després es disminueix la tensió, la flama es torna a allargar. Tendeix a recuperar la seva geometria inicial. Quan la tensió és zero, recupera la seva forma original. Es comporta de forma similar a un cos elàstic. Incrementant i disminuint cíclicament la tensió es pot fer oscil·lar la flama.

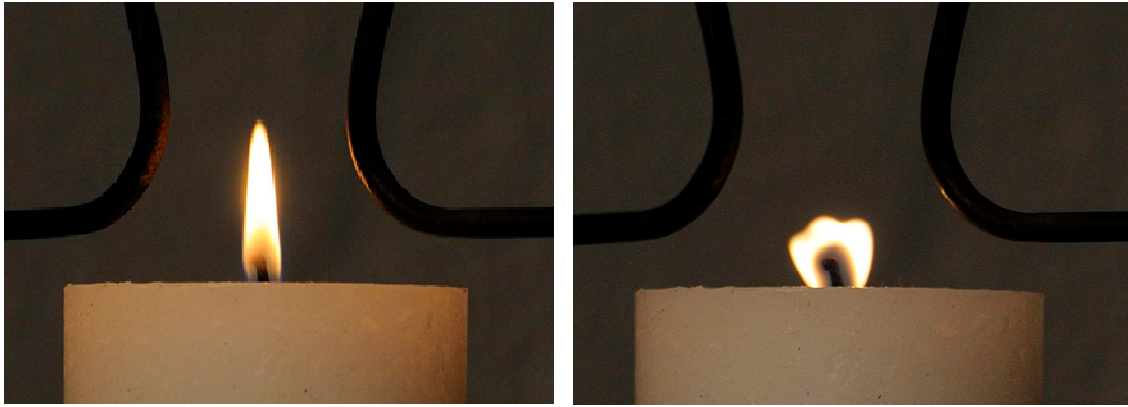


Fig.3.4 (a) Flama estable abans d'aplicar AT a l'explosor de banyes. (b) Deformació màxima de la flama a l'aplicar AT a l'explosor de banyes. (A.f. Martí, M.).

Es posa de manifest que hi ha una interacció entre la flama i el camp elèctric generat per les banyes. La flama no és elèctricament neutre, sinó que és rica en càrregues elèctriques. El ions positius es mouen de l'ordre de 100 vegades més lents que els electrons: els ions positius de l'ordre de 1-10mm/ μ s i els electrons 100-1000mm/ μ s [116]. Propicia que els electrons escapin més fàcilment del cos de la flama, que queda carregat positivament. El cos lluminós de la flama per naturalesa té una polaritat positiva.

Quan una flama s'apropa a un elèctrode amb polaritat negativa, tendeix a ser atreta. A l'annex B.2 es mostra un experiment que ho il·lustra. En l'experiment de l'explosor de banyes amb corrent altern, la polaritat dels elèctrodes varia cada semiperíode. Pot explicar l'oscil·lació de la flama.

A la Fig.3.5 s'han apropat els elèctrodes, respecte a la configuració de la Fig.3.4, de forma que $a=10\text{mm}$ i $h=5\text{mm}$. S'augmenta la tensió fins que es produeix una descàrrega disruptiva.

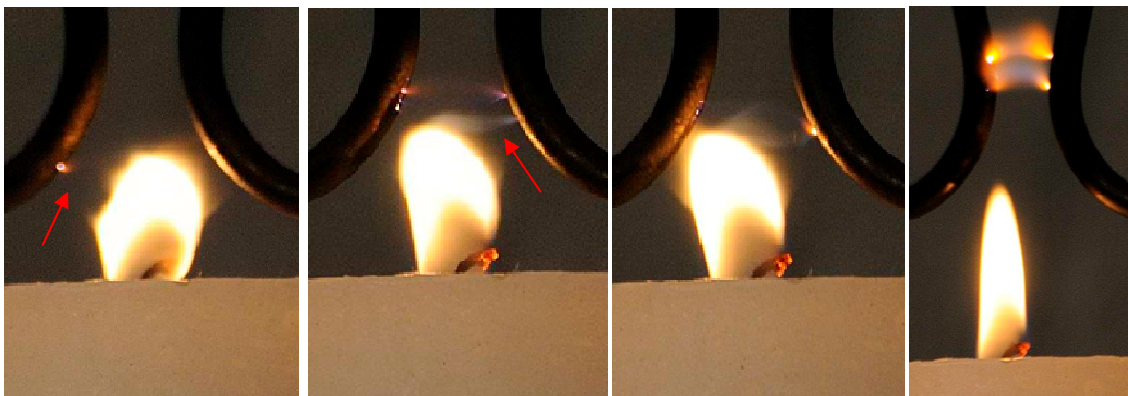


Fig.3.5 Oscil·lació d'una flama durant descàrregues en AT amb l'explosor de banyes. (A.f. Martí, M.).

En el primer fotograma s'observa que la flama es atreta per l'elèctrode de la dreta. Al mateix temps, s'observa un punt d'emissió relatiu a l'origen d'una descàrrega. En aquest punt hi ha una gran concentració d' ions amb càrrega positiva; i es forma un petit espai de polarització positiva [116]. Podria tenir relació amb la mossegada que s'observa a la flama, per una recombinació dels electrons procedents de l'elèctrode amb els ions positius de la flama.

Posteriorment, al segon i tercer fotograma, la flama es mou cap a l'elèctrode de l'esquerra. S'observa la formació de filaments lluminosos ramificats previs a la descàrrega disruptiva. El filament abans d'assolir l'altre elèctrode, està format bàsicament per fotons amb càrrega positiva [117]. La flama també té càrrega positiva i no s'observa una distorsió de la mateixa. L'elèctrode de la dreta està connectat a la font d'alta tensió. S'ha observat que les descàrregues disruptives en presència de foc comencen preferentment al semiperíode positiu (s'aborda més endavant). És coherent amb un allunyament de la flama d'aquest elèctrode i una aproximació al negatiu.

Al quart fotograma, s'observa la formació de descàrregues disruptives que ascendeixen per les banyes, mantenint-se a prop de la flama. A l'oscil·loscopi es registra circulació de corrent permanent. El corrent augmenta mentre la tensió disminueix. És una relació característica de l'arc, amb corrents reduïts. La flama s'allarga, amb tendència a recuperar la forma original. Aquests moviments de la flama, es perceben a ull nu com una oscil·lació de la mateixa.

A la Fig.3.6, s'han ajustat els elèctrodes de forma que $a=20\text{mm}$ i $h=5\text{mm}$. S'augmenta la tensió més enllà de la mínima necessària per produir una descàrrega disruptiva. Es produeixen descàrregues disruptives que ascendeixen per les banyes i s'extingeixen a l'allargar-se seguint un procés cíclic.

Al primer fotograma s'observa una situació anàloga a la del segon fotograma de la Fig.3.4. No obstant, es produeix en sentit contrari. En aquesta ocasió un filament lluminós ramificat, parteix de l'elèctrode de l'esquerra, mentre la flama és atreta pel de la dreta.

Al segon i tercer fotogrames s'observa l'ascensió de l'arc per les banyes mentre travessa la flama. S'aprecia una forma irregular, amb un efecte similar al de mossegades i un estretament en diversos punts. L'etapa de la descàrrega en forma d'arc, es caracteritza per una forta emissió d'electrons. La recombinació d'electrons amb els ions positius de la flama, disminueix la seva càrrega. Podria estar relacionat amb aquest efecte.

D'altra banda, la circulació de corrent dona lloc a camps magnètics. Les partícules de carboni, procedents de la piròlisi, són diamagnètiques i abundants en el cos lluminós de la flama. Els fenòmens de repulsió magnètica també podrien estar relacionats amb l'oscil·lació i deformació de la flama.

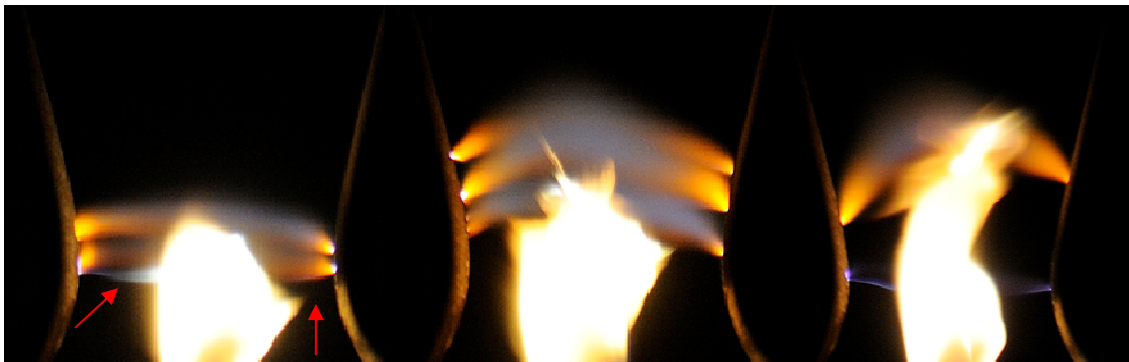


Fig.3.6 Oscil·lació d'una flama durant descàrregues en AT amb l'explosor de banyes. (temps entre fotogrames 300ms). (A.f. Martí, M.)

3.2.2.4.1.2 Flama procedent d'una torxa de gas butà

A la Fig.3.7 (a) es mostra una flama estable, procedent d'una torxa de gas butà, després d'aplicar tensió i abans de la descàrrega. En aquest exemple, s'han ajustat els elèctrodes i l'altura de la flama de forma que $a=20\text{mm}$ i $h=25\text{mm}$ ($h \geq 25\text{mm}$ evita descàrregues entre l'elèctrode i la boca).

A mesura que s'augmenta la tensió no és tan fàcilment visible, a ull nu, una deformació de la flama com en el cas de l'espelma. El cos lluminós blavós de la flama, no s'aprecia que es deformi o oscil·li. No obstant, a la Fig.3.7 (b), s'observa com després de la descàrrega la punta difusa de la flama s'allarga quan s'allunya l'arc (en analogia amb el comportament de la flama d'espelma).

La flama de la torxa és més estable que la flama de l'espelma. Les partícules de combustible són ejectades a una velocitat elevada des de la boca. La flama és menys sensible als corrents d'aire i s'observa que també al vent electrostàtic i als efectes d'atracció i repulsió observats.

D'altra banda, el color i l'estabilitat de la flama indiquen una bona combustió. Suggereix un nombre més reduït de partícules conductores diamagnètiques, procedents d'una combustió incompleta i de les impureses. Pot tenir relació, amb una possible contribució a la deformació i oscil·lació de la flama de les partícules, respecte el cas de l'espelma on eren més abundants.

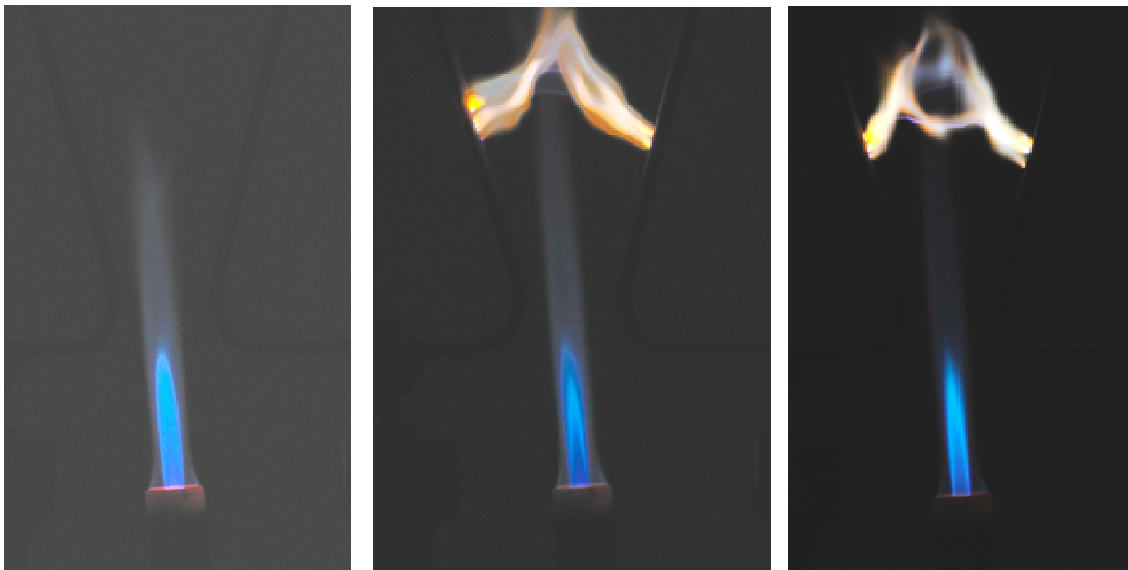


Fig.3.7 (a) Flama de butà estable a l'aplicar AT amb l'explosor de banyes. (b) Evolució de la flama de (a) al produir-se descàrregues disruptives (temps entre fotogrames 300ms). (A.f. Martí, M.).

A la Fig.3.8, s'ha apropiat la boca metàl·lica de la torxa als elèctrodes i s'ha connectat a terra. Durant l'experiment es produeixen algunes descàrregues cap a la boca, que poden distorsionar-lo.

No obstant, permet observar qualitativament com una flama de major potència, produeix un gran nombre de descàrregues ramificades. Tendeixen a mantenir-se a prop de la flama i a involucrar una superfície entre els elèctrodes significativament superior.

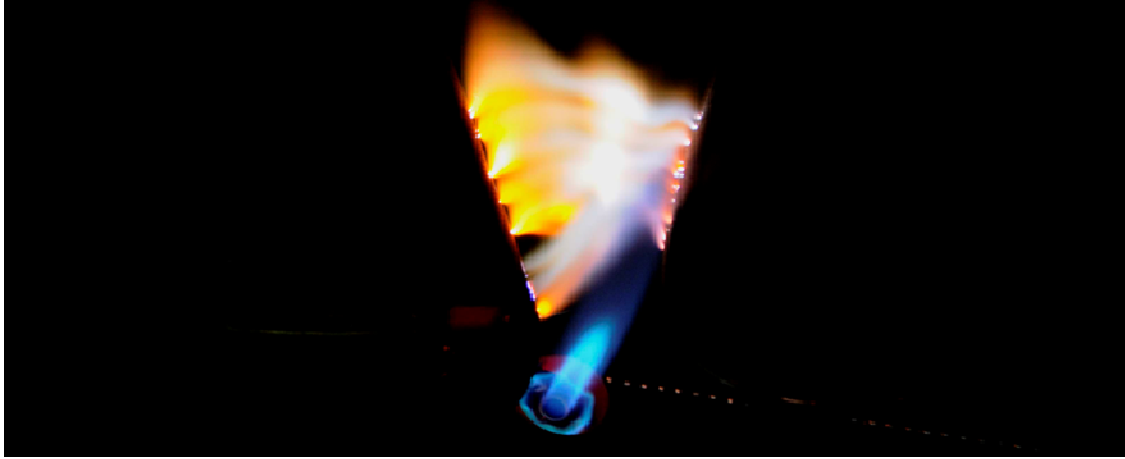


Fig.3.8 Descarregues amb flama de butà propera a les banyes. (A.f. Martí, M.).

3.2.2.4.2 Variació de la tensió disruptiva en presència de flames

Els resultats obtinguts al registrar les tensions disruptives (cresta) associades a l'experiment de l'explosor de banyes, sense i amb flama procedent d'una espelma, es presenten de forma gràfica a la Fig.3.9.

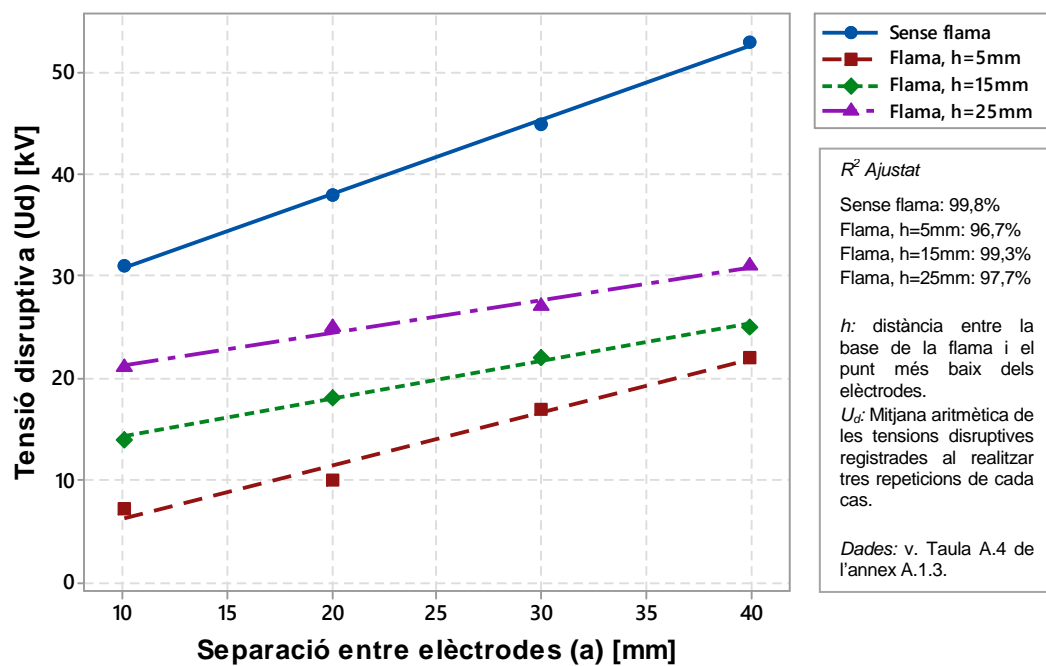


Fig.3.9 Evolució de U_d a l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma.

Quan l'experiment es realitza sense flama, les tensions disruptives en funció de la separació dels elèctrodes (a), tenen un comportament lineal i creixent. Quan l'experiment es realitza amb flama, també s'observa un comportament lineal i creixent a l'augmentar (a), per diversos valors d'altura de la base de la flama respecte els elèctrodes (h). Els coeficients R^2 ajustat de la regressió lineal són molt elevats.

S'observa que en presència de flama, les tensions disruptives són significativament inferiors que sense flama, per qualsevol cas. Es posa de manifest que el foc produeix un important efecte de disminució de la rigidesa dielèctrica de l'aire.

Quan $h=5\text{mm}$, el cos visible de la flama queda ubicat entre els dos elèctrodes abans de la descàrrega. Quan $h=15\text{mm}$ i $h=25\text{mm}$ el cos visible de la flama queda ubicat per sota. S'observa que quan el cos de la flama es troba entre els elèctrodes, les tensions disruptives són inferiors per qualsevol valor de (a) , que quan es troba per sota. Es relaciona amb que quan el cos visible de la flama no és entre els elèctrodes, l'espai que els separa assoleix una temperatura inferior i conté un nombre de càrregues elèctriques i partícules conductores procedents de la flama inferior. En el cas de $h=25\text{mm}$, les tensions disruptives són superiors que amb $h=15\text{mm}$. A mesura que el cos de la flama s'allunya dels elèctrodes, l'inici de la descàrrega requereix una tensió superior.

A mesura que la separació entre elèctrodes (a) augmenta, la tensió disruptiva augmenta, per qualsevol altura de la flama. Ho fa amb un pendent inferior al que es produeix quan no hi ha flama. Amb flama el pendent més pronunciat es dona en el cas que $h=5\text{mm}$. La flama només ocupa tot l'espai, comprés entre els punts dels elèctrodes on es produeix la primera descàrrega, quan $a=10\text{mm}$ i $h=5\text{mm}$. A mesura que augmenta (a) , augmenta el volum d'aire entre els elèctrodes no ocupat pel cos de la flama. Aquesta singularitat de la recta associada a $h=5\text{mm}$, explica un creixement més pronunciat, a mesura que la proporció de l'espai entre els elèctrodes ocupat per la flama, es redueix en relació amb l'espai ocupat per l'aire. Posa de manifest que les partícules conductores i càrregues presents al cos de la flama, contribueixen a la disminució de la rigidesa dielèctrica i que no és un efecte associat únicament a la variació de la temperatura o la pressió.

La tensió disruptiva mínima en presència de foc es troba en el punt en que a i h són mínims (la flama ocupa tot l'espai entre els punts dels elèctrodes on es produeix la primera descàrrega). La recta de $h=5\text{mm}$, es correspon amb un gradient de 7kV/cm , en les condicions d'aquest experiment i en el rang de valors presentat. La tensió disruptiva màxima en presència de foc es troba en el punt que a i h són màxims.

A la Fig.3.10 (a), es presenten els valors⁴⁶ percentuals als que s'han reduït les tensions disruptives en el cas $h=5\text{mm}$, en relació amb la tensió disruptiva sense flama.

La tensió disruptiva mínima obtinguda representa el 22,9% de la que s'obté sense flama. A la Fig.3.10 (b), es presenten anàlegs valors en funció de (h) quan $a=10\text{mm}$. Es posa de manifest un significatiu augment de la tensió disruptiva a mesura que s'allunya l'espelma dels elèctrodes; i les condicions del medi es van equiparant amb les que es manifesten en absència de foc.

D'altra banda, al substituir l'espelma per la torxa de butà, s'ha ubicat la base de la flama a una distància mínima de 25mm , per evitar descàrregues contra la seva boca metàl·lica. Al reproduir el cas de $h=25\text{mm}$, s'ha obtingut una relació lineal i creixent entre la tensió disruptiva (U_d) i la separació d'elèctrodes (a) . La tendència és anàloga a la del cas de l'espelma.

⁴⁶ Els valors es tabulen a la taula A.5 de l'annex A.1.3.

Els valors discrets de U_d entre ambdós variants de l'experiment, són difícilment comparables per diversos factors. La naturalesa i geometria de les flames és diferent. El diàmetre de la flama de la torxa, en aquest cas, és de l'ordre del doble que el de l'espelma. La flama de la torxa és poc sensible al vent electrostàtic. Pot tenir una presència de partícules conductores més reduïda, atès que el color indica que la combustió és bona. La velocitat de la flama de la torxa també afecta de forma diferent a les partícules d'aire del seu entorn. Per exemple, en el cas de $a=20\text{mm}$ i $h=25\text{mm}$, amb la torxa s'obté $U_d=17,8\text{kV}$ i amb l'espelma $U_d=25\text{kV}$.

Es difícil establir com contribueix cada factor a la divergència de resultats. No obstant, les reduccions, de l'ordre del 30%, són coherents amb una major conductivitat del medi deguda a un major volum de la flama de la torxa. Comporta un major escalfament i ionització.

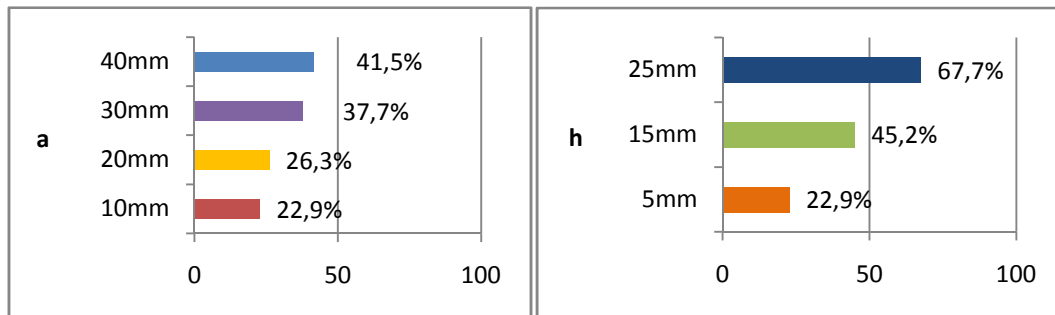


Fig.3.10 (a) Relacions de reducció de U_d a l'explosor de banyes amb flama (d'espelma) en funció de (a). (b) Relacions de reducció de U_d a l'explosor de banyes amb flama (d'espelma) en funció de (h).

3.2.2.4.3 Anàlisi de les descàrregues a partir d'oscil·logrames de tensió i corrent

La descàrrega disruptiva amb l'explosor de banyes en absència de flama, es produeix de forma abrupta. No són perceptibles a ull nu descàrregues parcials prèvies. Els elèctrodes presenten simetria i la ruptura dielèctrica es produeix en el semiperíode positiu i negatiu.

A la Fig.3.11 es mostren oscil·logrames de tensió i corrent típics d'aquest experiment. Un comportament habitual és que l'arc s'allargui pujant per les banyes, s'extingeixi i es torni a cebar més a baix. També és típic que romanguí encès, mantenint un dels dos extrems realitzant petits desplaçaments al voltant d'un punt, mentre que l'altre extrem es desplaça sobre l'altre elèctrode modificant la longitud de l'arc cíclicament.

A l'oscil·lograma (A) s'observa la característica de tensió-corrent decreixent típica de l'arc (en el rang de corrents d'aquest experiment). Quan l'arc té poca longitud, la tensió és més baixa i el corrent és més gran. Quan l'arc s'allarga, la tensió augmenta i el corrent es redueix. Si l'arc s'extingeix i es reencén més avall, es produeix una discontinuïtat (senyalada per l'eix discontinu).

A l'oscil·lograma (B) es mostra una ampliació on s'observa la forma típica de tensió i corrent, durant una etapa de conducció contínua amb l'arc estable.

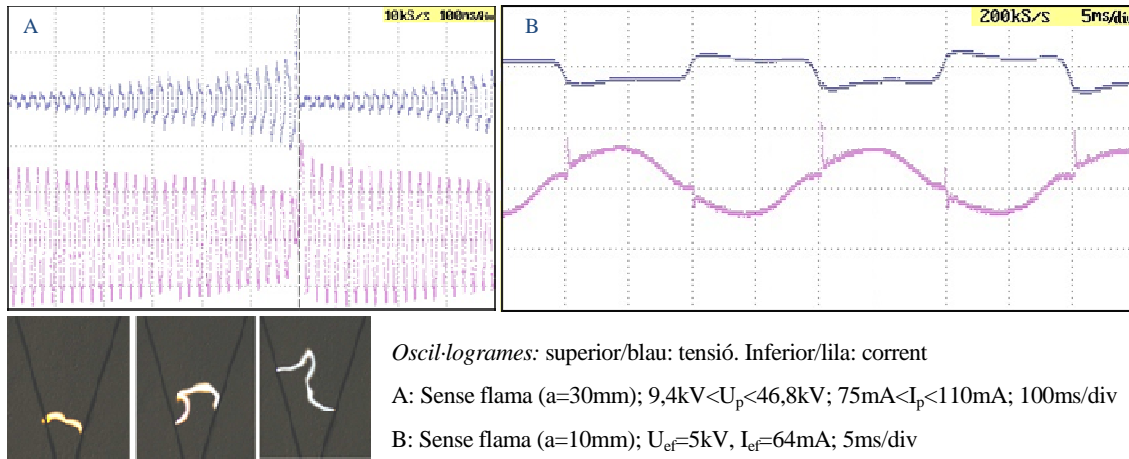


Fig.3.11 Oscil·logrames relatius a l'experiment de l'explosor de banyes sense flama.

La descàrrega disruptiva amb l'explosor de banyes amb flama, no es produeix de forma tan intempestiva com en el cas anterior. Són perceptibles a ull nu descàrregues parcials prèvies, a mesura que s'augmenta la tensió, en la zona de menor separació entre els elèctrodes ionitzada pel foc. Les descàrregues tendeixen a desplaçar-se, però ho fan a prop d'aquesta zona. No s'allunyen pujant per les banyes. Tendeixen a desplaçar-se en l'espai de menor impedància generat per la flama. Com l'arc no s'allarga tant, les variacions de tensió són inferiors i el corrent es manté més estable. Aquest comportament es reflecteix en els oscil·logrames de tensió i corrent de la Fig.3.12.

En el pas per zero del corrent, es pot produir la extinció i una discontinuïtat en la circulació del corrent. No obstant, la regeneració dielèctrica és molt difícil en presència de foc i normalment l'arc es reencén ràpidament. La conducció és bàsicament continua amb breus interrupcions transitòries.

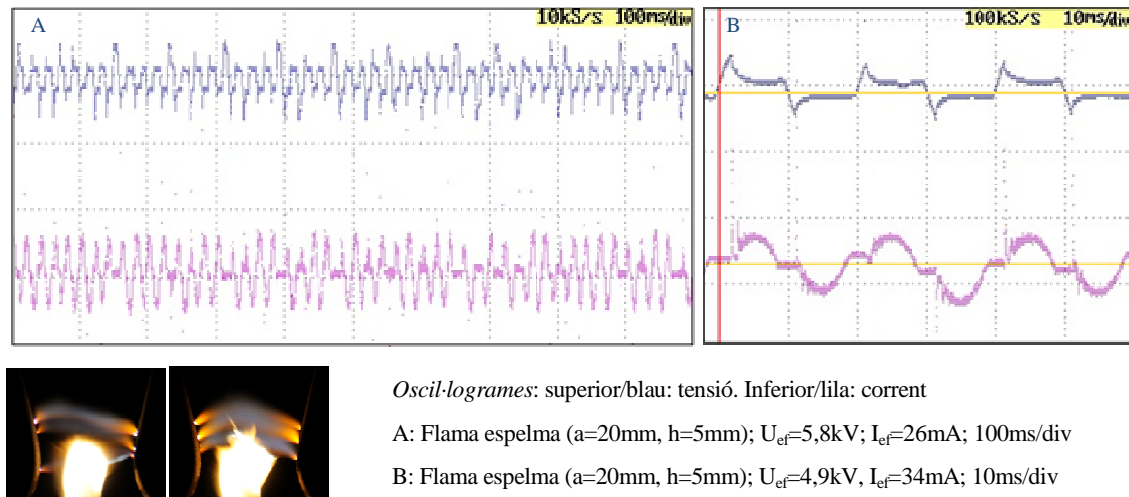


Fig.3.12 Oscil·logrames de l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma.

S'ha observat que la ruptura dielèctrica es produeix preferentment en el semiperíode positiu de la tensió. Quan la flama s'ha situat entre els elèctrodes, sempre s'ha produït en el semiperíode positiu. Als oscil·logrames de tensió i corrent (A) de la Fig.3.13, es mostra un instant de ruptura dielèctrica i la conducció característica associada, relatius a l'experiment de l'explosor de banyes amb el cos de la flama ubicat entre els elèctrodes ($h=0,5\text{mm}$).

El cos oscil·lant i carregat amb polaritat positiva de la flama influeix en el camp elèctric entre els elèctrodes i el fa menys homogeni. Durant el semiperíode positiu els electrons procedents de la flama és més fàcil que siguin capturats per l'elèctrode. Intensifica el camp elèctric, afavoreix l'increment de velocitat dels electrons, la formació de l'arc i la conducció. Durant el semiperíode negatiu la flama ajuda a que els elèctrons es dispersin i es recombinin amb els ions positius del seu cos. Dificulta la formació de l'arc i la conducció.

Si es disminueix lleugerament la tensió (de l'ordre d'un 5%) per sota de la tensió disruptiva, s'observa que l'arc es manté encès. Quan el corrent passa per zero l'arc s'extingeix i després d'un transitori la tensió tendeix a ser la de la xarxa. Una tensió inferior és suficient per produir la reencesa de l'arc a causa del plasma residual de l'arc. La presència de la flama pot dificultar encara més la regeneració dielèctrica, propiciant que l'arc es mantingui encès.

Quan es produeix l'extinció de l'arc sense reencesa, s'ha observat un interval de conducció discontinua. A l'oscil·lograma (B) de la Fig.3.13 s'observa l'extinció de l'arc i que deixa de circular corrent. Hi ha un període d'inactivitat. Posteriorment apareixen noves descàrregues espontànies. A l'oscil·lograma (C) s'observa que les descàrregues es produeixen preferentment en el semiperíode positiu. El semiperíode negatiu no condueix. Si es baixa més la tensió la interrupció de la conducció dura més semiperíodes. Es pot fer perceptible a ull nu una alternança de períodes d'inactivitat amb l'aparició de descàrregues espontànies de duració breu. S'ha observat en un rang de l'ordre d'un 20-30% de disminució de la tensió respecte la tensió disruptiva.

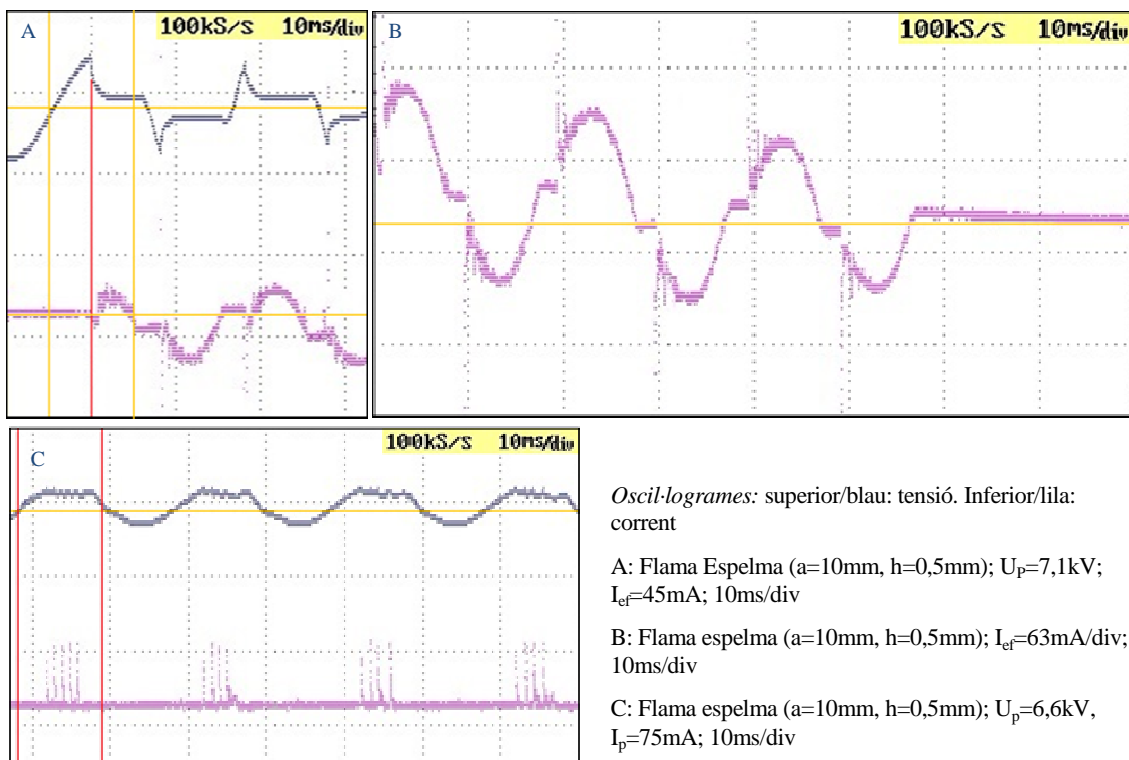


Fig.3.13 Oscil·logrames de l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma.

Aquesta casuística està relacionada amb la disminució variable de la rigidesa dielèctrica de l'aire produïda per la flama. La polaritat afecta al procés de descàrrega que es veu afavorit quan es positiva. També suggereix que durant el temps que no es produeixen descàrregues la flama va disminuint la rigidesa dielèctrica de l'aire. La ionització de la flama pot augmentar amb el temps després de les descàrregues.

El desplaçament de la flama, per la interacció amb el camp elèctric de les banyes quan s'aplica AT, pot afavorir un augment de la temperatura de l'aire que separa els elèctrodes. El seu cos canvia de forma i oscil·la apropant-se als elèctrodes. L'escalfament no és anàleg al que produeix en estat natural quan es parteix de tensió zero. El seu moviment també pot propiciar la presència de partícules conductores en un volum d'aire més ampli.

3.2.3 Experiments amb explosor amb forma de Thiele refrigerat en presència de flames

3.2.3.1 Introducció als experiments

Els elèctrodes tendeixen a escalfar-se ràpidament en contacte amb flames amb una certa envergadura i potència, fins a temperatures que els poden malmetre i distorsionar els experiments. S'ha dissenyat i construït un explosor amb elèctrodes de coure refrigerats, inspirat en el funcionament del tub de Thiele. S'utilitza per realitzar experiments en els que es continua il·lustrant i analitzant el problema de les descàrregues que es produeixen en els sistemes de AT durant els incendis.

Permet realitzar experiments en presència de flames amb una duració superior, gràcies a l'efecte de la refrigeració. La seva geometria facilita la introducció de diferents tipus de flames, de major potència i des de trajectòries i sentits diferents, per analitzar els seus efectes. L'efecte de la temperatura dels elèctrodes també pot ser observat.

3.2.3.2 Materials i muntatge

La construcció, característiques i muntatge de l'explosor de Thiele amb elèctrodes refrigerats s'especifiquen a l'annex C.2. S'utilitza aigua com a refrigerant. L'explosor es munta sobre dos aïlladors de AT. La distància que separa els elèctrodes (a) es ajustable. Mitjançant una torxa de gas butà, s'introdueixen flames entre els elèctrodes. La configuració geomètrica del muntatge permet emetre-les des de diverses direccions i sentits (v. Fig.C.2 de l'annex C.2).

La torxa de gas butà que s'utilitza té una boca de 50mm de diàmetre. La longitud i amplitud de la flama és ajustable mitjançant un regulador de gas. Pot produir flames de més de 400mm de longitud i amplituds amb un diàmetre de l'ordre de 150mm. Quan es genera una flama de màxima longitud, aproximadament un terç de la flama és de color blau i té una forma estable. La resta és de color groc i taronja i té una forma variable amb un extrem oscil·lant. En aquesta zona la temperatura és més baixa i la combustió no és tan bona. És rica en partícules carbonoses conductores que poden presentar incandescència. Deixa una capa de sutge sobre les superfícies que afecta. S'assimila a les flames descontrolades que es troben generalment en els incendis.

3.2.3.3 Metodologia

3.2.3.3.1 Variació de la forma de les flames

S'ajusta la separació entre els elèctrodes de forma que $a=50\text{mm}$. L'explosor s'omple d'aigua a temperatura ambient. L'elèctrode de la dreta es connecta a la font de AT i el de l'esquerra a terra.

Es fixa la torxa de gas butà sota dels elèctrodes seguint la direcció de l'eix vertical (y). El centre de la boca coincideix amb el punt mig de la distància de separació entre els elèctrodes. La torxa s'ubica suficientment allunyada dels elèctrodes com perquè no es produeixin descàrregues cap a la boca. S'encén la torxa i s'ajusta la flama de forma que l'extrem quedi ubicat entre els dos elèctrodes. Es registra fotogràficament l'experiment.

3.2.3.3.2 Influència de la temperatura, direcció i sentit de les flames

S'ajusta la separació entre els elèctrodes (a). L'explosor s'omple d'aigua a temperatura ambient. L'elèctrode de la dreta es connecta a la font de AT i el de l'esquerra a terra.

S'aplica tensió sinusoidal de freqüència $f=50\text{Hz}$, fins que es produeixen descàrregues disruptives entre els elèctrodes (sense flames). Es registren les tensions disruptives associades (valor mig de tres repeticions) i es fotografia l'experiment.

Es fixa la torxa de gas butà sota dels elèctrodes alineada amb la direcció de l'eix vertical (y), aplicant les mateixes especificacions geomètriques que a l'apartat 3.2.3.3.1. S'encén la torxa i s'ajusta la flama, de forma que la part central de la zona groga-taronja afecti totalment l'espai que separa els elèctrodes.

S'aplica tensió sinusoidal de freqüència $f=50\text{Hz}$, fins que es produeixen descàrregues disruptives entre els elèctrodes. Es registren les tensions disruptives associades (valor mig de tres repeticions), la temperatura final dels elèctrodes i es fotografia en mode continu l'experiment.

Es refreda l'explosor i es renova l'aigua a temperatura ambient. Es comprova la temperatura inicial dels elèctrodes amb una càmera termogràfica. S'ajusta la separació entre els elèctrodes (a). S'encén la torxa i s'ajusta la flama, de forma que ara sigui la part central de la zona blava la que afecti totalment l'espai que separa els elèctrodes. Es repeteix l'experiment i registres anteriors.

Seguint la metodologia exposada es repeteixen els experiments i registres, fixant la torxa alineada amb l'eix horitzontal que uneix els dos elèctrodes (x); i després amb l'eix perpendicular a l'anterior sobre el pla horitzontal (z). Finalment es repeteixen els experiments, en les tres direccions indicades, variant el sentit d'introducció de la flama.

Els experiments es realitzen per valors de separació dels elèctrodes de $a=20\text{mm}$, $a=50\text{mm}$ i $a=100\text{mm}$.

3.2.3.3 Influència de la temperatura dels elèctrodes en l'experiment

Tot i que la bibliografia i experiència prèvia feien preveure que la temperatura dels elèctrodes no tindria una influència significativa en les observacions i registres, s'ha comprovat empíricament en el rang de temperatures dels experiments.

S'ajusta la separació entre els elèctrodes amb $a=100\text{mm}$. L'explosor no s'omple d'aigua. L'elèctrode de la dreta es connecta a la font de AT i el de l'esquerra a terra.

Es fixa la torxa de gas butà, alineada amb la direcció de l'eix horitzontal que separa els elèctrodes (x). S'encén la torxa i s'ajusta la flama de forma que la zona blava ompli completament l'espai que separa els elèctrodes. S'espera a que els elèctrodes assoleixin una temperatura de 200°C (mesurat amb càmera termogràfica). S'aplica tensió sinusoidal de freqüència $f=50\text{Hz}$, fins que es produeixen descàrregues disruptives entre els elèctrodes. Es registren les tensions disruptives (valor mig de tres repeticions).

3.2.3.4 Descripció, resultats i discussió

3.2.3.4.1 Variació de la forma de les flames

A la Fig.3.14 s'observa l'efecte del camp elèctric, que apareix entre els elèctrodes a l'aplicar AT, sobre l'extrem de la flama de butà. La forma i oscil·lació de la flama varia respecte la que té naturalment. Es produeixen uns efectes de repulsió i atracció als elèctrodes. Són similars als que s'han observat anteriorment a l'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma.

Si s'apropa la part blava de la flama, amb més velocitat i millor combustió, aquests efectes no són visibles. De forma anàloga al que succeïa en l'experiment de l'explosor de banyes amb flama blava procedent d'una torxa de butà.

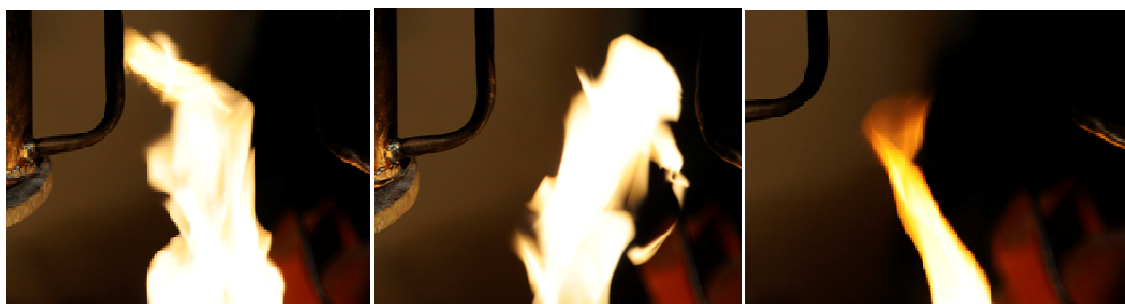


Fig.3.14 Oscil·lació d'una flama de butà entre els elèctrodes de l'explosor de Thiele. (A.f. Martí, M.).

3.2.3.4.2 Influència de la temperatura, direcció i sentit de les flames

Al realitzar una descàrrega disruptiva entre els elèctrodes de coure de l'explosor de Thiele, s'observa que es produeix de forma abrupta. No són fàcilment apreciables descàrregues parcials prèvies. La descàrrega disruptiva és inicialment ramificada i tendeix a desplaçar-se entre els elèctrodes cap amunt (v. Fig.3.15(a)).

Si eventualment s'introdueix una flama, en aquest cas procedent d'una torxa de gas butà, que faci contacte amb els dos elèctrodes, s'observa que a una tensió molt més reduïda apareixen descàrregues visibles en l'interior de la flama (v. Fig.3.15(b)). Inicialment es produeixen descàrregues parcials. Si s'augmenta la tensió, evolucionen cap a descàrregues disruptives en forma d'arc i conducció continua.

Quan la flama s'aplica localment, les descàrregues tendeixen a desplaçar-se a l'interior o a prop de la flama, mentre la tensió es manté en valors propers a la tensió disruptiva. Segueixen el camí de menor impedància propiciat per la major conductivitat de la flama.

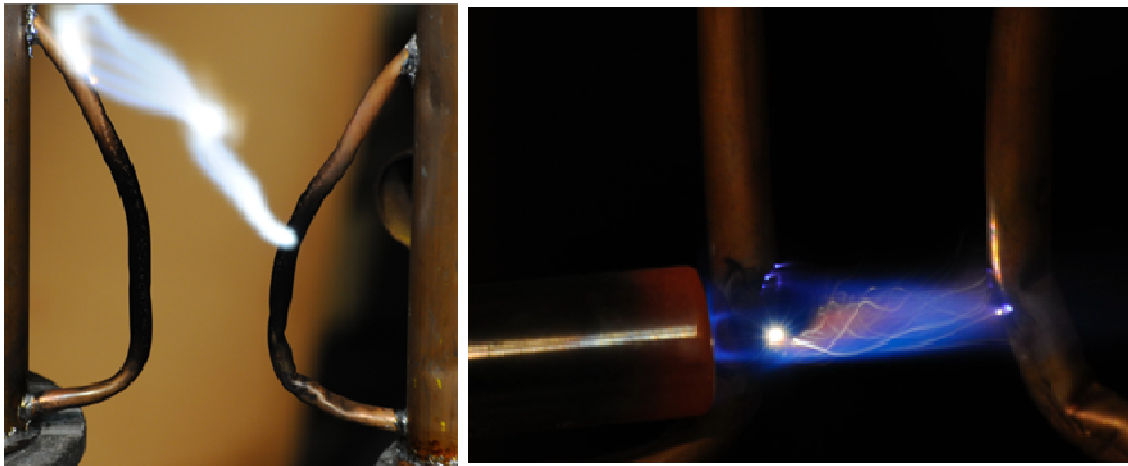


Fig.3.15 (a) Descàrrega en l'explosor de Thiele sense flama. (b) Descarregues en una flama de butà entre els elèctrodes de l'explosor de Thiele. (A.f. Martí, M.).

Quan es realitza l'experiment introduint flames des de la torxa de gas butà amb una boca de diàmetre de $D=50\text{mm}$, s'ha observat un comportament similar per diferents distàncies de separació (a) dels elèctrodes i per les diferents zones de la flama. A la Fig.3.16 (a), es mostren diversos exemples de la formació de descàrregues parcials i filaments previs a la descàrrega disruptiva i l'arc. Es produeixen en un rang de tensions de l'ordre d'un 20-25% inferiors a la tensió disruptiva (en el rang de 3-60kV en que s'han realitzat els experiments).

S'observen els punts d'emissió sobre els elèctrodes. Els efluvis o filaments creixen com una prolongació del punt d'emissió iònica, amb formes tortuoses i sovint ramificades. S'observa que la direcció i velocitat de la flama influeix en la forma d'aquestes descàrregues. El moviment direccional de les partícules de la flama desplaça els ions que formen les descàrregues. Els filaments tendeixen a seguir inicialment la direcció de la flama com s'observa a la figura.

A la Fig.3.16 (b) es mostra l'estat d'un elèctrode després d'haver estat sotmès a l'acció de les flames i de les descàrregues. El contacte amb la flama, especialment en la zona groga-taronja, produeix una capa superficial de sutge que recobreix l'elèctrode. No queda fortament adherit, pel que es pot netejar fàcilment amb aigua. Sobre el sutge s'observen les marques dels punts d'emissió de l'arc. Deixen un rastre de l'evolució del seu desplaçament sobre l'elèctrode. Podria tenir un efecte de dilució dels rastres sobre el metall.

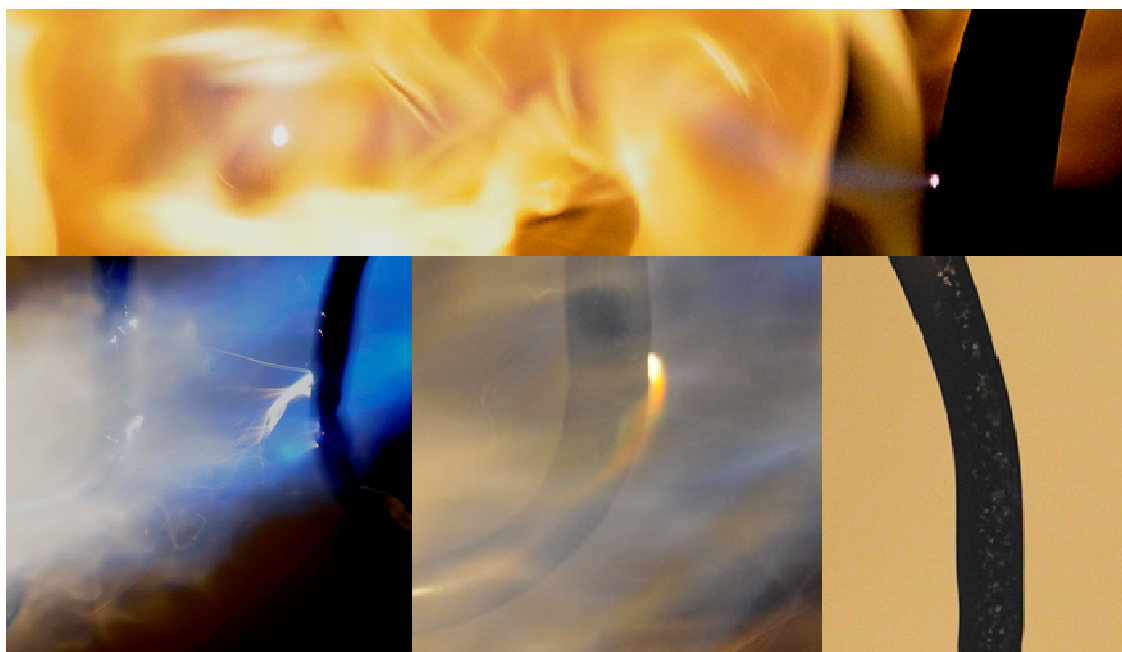


Fig.3.16 (a) Descàrregues prèvies a l'arc entre els elèctrodes de l'explosor de Thiele amb flama de butà. (b) Marques de l'arc i sutge adherit a un elèctrode de l'explosor de Thiele. (A.f. Martí, M.).

A la Fig.3.17 es mostren descàrregues disruptives entre els elèctrodes, durant l'experiment en que les flames segueixen aproximadament la direcció dels eixos (x,y,z) que s'han definit a 3.2.3.3.2.



Fig.3.17 Descàrregues entre els elèctrodes amb una flama de butà dirigida sobre diferents eixos. (A.f Martí, M.).

S'observa que la direcció de la flama influeix en la forma de les descàrregues. Especialment a prop de l'elèctrode, on és més clar que tendeixen a corbar-se per seguir la direcció de la flama.

S'havia realitzat la hipòtesi que es podria obtenir una tensió disruptiva inferior en el cas de l'eix horitzontal que uneix els elèctrodes (x), atès que la flama propicia que les descàrregues segueixin el camí de menor longitud entre els elèctrodes. No obstant, els resultats experimentals, seguint la metodologia exposada, no han permès constatar una diferència significativa. No s'observa una diferència apreciable entre els valors de la tensió disruptiva, quan les flames segueixen els tres eixos.

La variació del sentit en el que s'introdueix la flama, tampoc s'ha observat que tingui una influència en el valor de les tensions disruptives obtingudes durant els experiments.

Les tensions disruptives (cresta), obtingudes durant l'experiment sense flama i l'experiment en que s'ha introduït la flama en la direcció de l'eix vertical (y), es presenten a la Fig.3.18. En analogia amb l'experiment de l'explosor de banyes, s'obté que la relació entre l'augment de la separació dels elèctrodes (a) i l'augment de la tensió disruptiva és lineal (en el rang de tensions de l'experiment). També es produeix una disminució molt significativa de la tensió disruptiva en presència de flama.

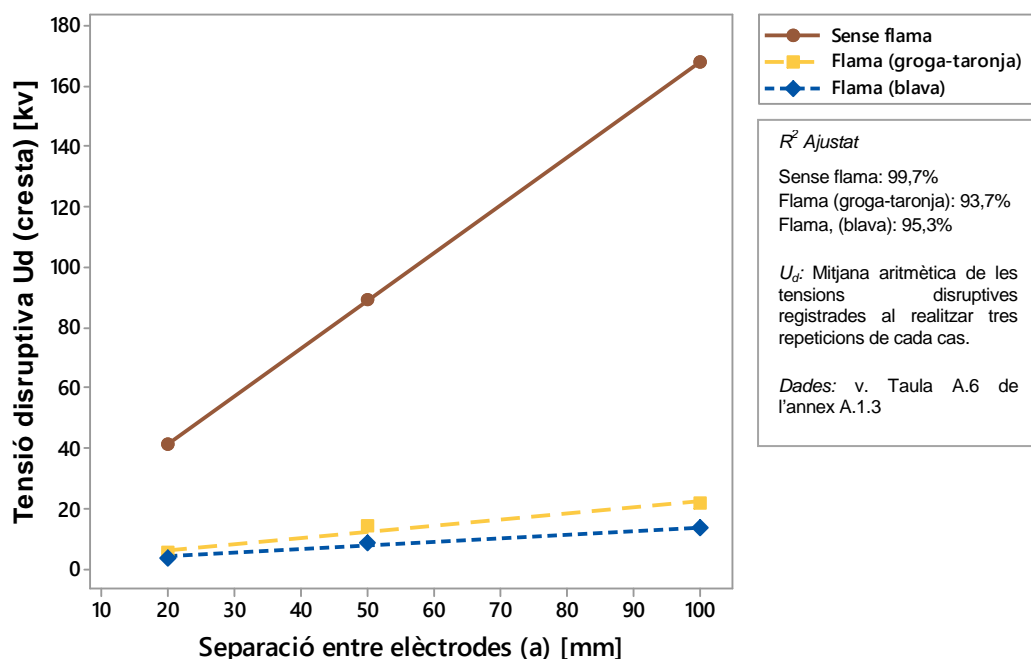


Fig.3.18. Evolució de les tensions disruptives en l'experiment de l'explosor de Thiele.

Les tensions disruptives es redueixen a valors de l'ordre del 12-15% en la zona groga-taronja de la flama, respecte els valors sense flama; i al 7-10% en la zona blava. Són similars pels diferents valors de separació dels elèctrodes (a). És posa de manifest que en la zona blava (de major temperatura i ionització), es produeix una reducció de la tensió disruptiva significativament superior. La metodologia d'aquest experiment, no permet discernir quina influència pot tenir una possible concentració superior de partícules conductores, procedents de la combustió, en la zona groga-taronja.

Els pendents de les rectes relatives als experiments amb flama són significativament inferiors als de la recta de l'experiment sense flama. La reducció en valor absolut de la tensió és més accentuada en els sistemes de major tensió, amb separacions superiors associades. En els sistemes reals, separacions que habitualment són segures poden deixar de ser-ho en condicions de foc.

3.2.3.4.3 Influència de la temperatura dels elèctrodes

La temperatura dels elèctrodes refrigerats amb aigua, mesurada amb càmera termogràfica al finalitzar els experiments, es troba en un rang de 80°C-120°C. L'ebullició de l'aigua dels contenidors de l'explosor és un indicador visual que s'han assolit temperatures superiors als 100°C.

Al realitzar l'experiment sense aigua, fins assolir una temperatura de 200°C, s'ha comprovat que la temperatura dels elèctrodes no modifica els valors de les tensions disruptives obtingudes. És coherent amb la bibliografia i l'experiència prèvia existent. Els resultats en el rang de temperatures en que es desenvolupa l'experiment, no varien amb l'increment de la temperatura dels elèctrodes.

D'altra banda, les soldadures de l'explosor realitzades amb estany plata, no fan aconsellable superar temperatures de 250°C perquè podrien comprometre les unions.

3.2.4 Experiments de descàrrega entre una filassa d'alumini i una platina d'acer amb foc

3.2.4.1. Introducció als experiments

Els experiments pretenen aproximar-se a la simulació del cas que una línia aèria de MT es vegi afectada per les flames d'un incendi. Es centra en la conducció entre un conductor i una platina d'acer connectada a massa. Reprodueix la conducció des d'un conductor actiu cap a un cos a potencial terra en condicions de foc (p.e. una ferramenta o l'estructura d'acer de la línia, una estructura metàl·lica d'un altre component o aliena a la línia, etc).

La distància dielèctrica mínima per evitar descàrregues disruptives entre conductors i cossos a potencial de terra, permesa per la normativa, és significativament menor que la permesa entre conductors (perquè té en compte el moviment dels conductors provocat per l'acció del vent). Estadísticament sembla que les zones properes als suports pateixen un nombre superior d'incidències relacionades amb les descàrregues produïdes durant els incendis. Es tracta de la situació probablement més crítica associada a una línia aèria.

Les flames procedents d'un incendi poden acostar-se als conductors actius d'una línia. També existeix la possibilitat, amb la reglamentació vigent a Espanya i a Catalunya, que facin entrar en contacte a través del seu cos, els conductors d'una línia aèria entre ells o amb cossos a potencial terra. Per exemple, en el cas d'una línia aèria de MT o AT que travessa un bosc.

El Reglament de Línies Elèctriques d'Alta Tensió (RLAT) de 2008, estableix una zona de protecció de la línia per evitar un contacte amb arbres que produeixi interrupcions del servei o incendis [118]. Ve definida per la zona de servitud de vol, la distància resultant de la projecció dels conductors

extrems de la línia en la seva posició més desfavorable a nivell d'inclinació, incrementada a ambdós costats de la projecció pel resultat de l'equació Eq.3.2:

$$D_s = \text{Mínim}(D_{el} + 1,5\text{m}, 2\text{m}) \quad (\text{Eq.3.2})$$

On D_{el} , és una distància que evita les descàrregues entre les parts en tensió de la línia i objectes a potencial terra, en condicions d'explotació normal de la xarxa, definida pel Reglament en funció de la tensió més elevada de la xarxa. La tensió més elevada de la xarxa que correspon a una línia de $U_N=25\text{kV}$ és de $U_s=30\text{kV}$. La distància D_{el} associada, segons la taula 15 del RLAT, és de $D_{el}=0,27\text{m}$ [119]. En aplicació de l'equació Eq.3.2, la distància mínima que incrementa la zona de servitud a banda i banda del conductor extrem de la línia és de 2m per aquest nivell de tensió.

La distància entre els conductors i els arbres pot ser superior a la mínima exigida pel RLAT, per les distàncies de seguretat addicionals que les comunitats autònomes estableixen per regular els treballs de poda destinats a evitar incendis. Per exemple a Catalunya, el Decret 268/1996 del 23 de Juliol [120], estableix que s'han de realitzar podes cada tres anys per preveure el creixement dels arbres i disminuir el risc d'incendi per contacte amb la línia. Per línies aèries amb $1\text{kV} \leq U_N \leq 60\text{kV}$, amb espècies de creixement ràpid la distància mínima vertical que cal afegir al gàlib vertical és de 7m; i per espècies de creixement lent de 6m. La distància també pot ser inferior a la mínima exigida pel RLAT, quan el manteniment de la línia no és l'adequat.

En un incendi forestal de capçades un heurístic per l'alçada de les flames, mesurades des de terra, és de l'ordre de 2-3 vegades l'altura de l'arbre (en funció de l'espècie, vent, etc)⁴⁷. Des del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya s'estima, per la seva experiència en el territori, que l'alçada de les flames pot arribar als 20m per sobre de la massa vegetal. Els valors són coherents entre ells, tenint en compte l'alçada dels arbres que formen habitualment el bosc Mediterrani. La component horitzontal de la longitud de la flama s'estima, des del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya, en valors de l'ordre de fins a 12m respecte els límits del bosc. Aquests valors són superiors a les distàncies de seguretat que es regulen per evitar el contacte entre els arbres i els conductors de la línia. En cas d'incendi la línia es pot veure afectada directament per les flames, encara que hagi estat podada o eliminada la massa vegetal ubicada en la seva zona de protecció.

3.2.4.2 Materials i muntatge

El croquis del muntatge de l'experiment i els materials utilitzats es detallen a la Fig.3.19. Utilitzant una corda se subjecta una cadena de tres aïlladors de vidre, procedent d'una línia de MT amb $U_N=25\text{kV}$, a una barra fixada al sostre. Amb un joc de ferramentes es fixa un tram, de 700mm de longitud, d'una filassa formada per 6 fils d'alumini aliat trenats amb una ànima d'acer. És del mateix tipus que s'instal·la en algunes línies de MT de $U_N=25\text{kV}$ de Catalunya. La corda permet ajustar l'altura de la filassa (h). La filassa es connecta a l'equip d'assaig de AT mitjançant una grapa connectada a una cadena, que al mateix temps la manté estesa amb certa tensió mecànica.

⁴⁷ Estimació procedent del Departament d'Enginyeria Química de la UPC (Dra. Elsa Pastor).

Es fixa una platina d'acer ranurada, de 400mm de longitud i 100mm d'amplada, sobre un aïllador de AT. La distància entre la platina i el conductor (a) és ajustable. La platina es connecta a terra. Sobre l'aïllador també es fixa la boca d'una torxa de gas butà (s'utilitza una torxa amb una boca de $D=22\text{mm}$ i una altra amb $D=50\text{mm}$). La boca de la torxa es connecta a terra. La flama procedent de la boca de $D=50\text{mm}$, té l'amplitud suficient per embolcallar la platina i travessar les seves ranures.

Durant els experiments descrits a l'apartat 3.2.3.4.2, s'ha vist que la direcció de la flama no influïa significativament en els valors de les tensions disruptives. La direcció en que s'introdueix la flama en aquest muntatge, podria reproduir les flames que s'acosten lateralment durant un incendi forestal des dels arbres ubicats fora de la zona de seguretat de la línia (amb vegetació podada o eliminada). La flama es pot introduir també fàcilment des d'avall, seguint l'eix vertical, subjectant la boca de la torxa verticalment en el punt mig entre la platina i el conductor.

Quan s'utilitza la torxa amb una boca de 50mm, s'ajusta la distància entre la boca i la platina, de forma que regulant el gas es pugui aconseguir que la zona groga-taronja de la flama ompli el forat entre la platina i la filassa. Aquesta part de la flama més irregular, oscil·lant, turbulenta i de combustió incompleta, s'assimila més a les flames que es produeixen en diversos tipus d'incendis. Per exemple, en un incendi forestal la temperatura màxima de les flames s'estima en 1000°C - 1200°C en el terç inferior de la flama⁴⁸. Aquestes temperatures màximes són inferiors en la resta de la flama. Són temperatures de l'ordre de magnitud de les que es donen a la zona groga-taronja de la flama de la torxa de butà.

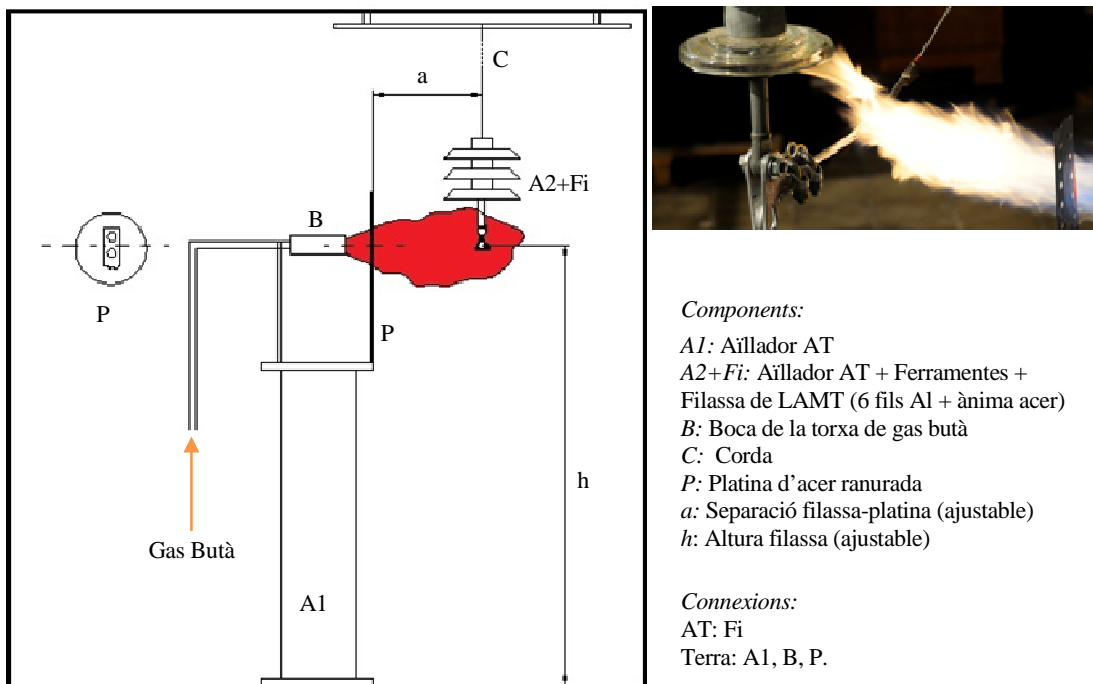


Fig.3.19 Croquis de l'experiment de descàrrega entre una filassa de Al i una platina (A.f. Martí, M.)

⁴⁸ Per fonts del Departament d'Enginyeria Química de la UPC (Dra. Elsa Pastor).

3.2.4.3 Metodologia

En una primera etapa preliminar, destinada a visualitzar millor la formació de les descàrregues, s'utilitza la torxa de gas butà amb la boca de $D=22\text{mm}$. S'encén la torxa i s'emet una flama amb un cos visible blau, de l'ordre de 60mm de longitud. La flama travessa la platina per una de les seves ranures, de forma que el seu cos hi estigui en contacte. S'ajusta la separació entre la zona de contacte amb la flama de la platina i la filassa a un valor de $a=220\text{mm}$. S'augmenta la tensió fins que es produeixen descàrregues disruptives. Es fotografia en mode continu l'experiment.

Posteriorment s'utilitza la torxa de gas butà amb la boca de $D=50\text{mm}$. L'altura de la filassa respecte el terra s'ajusta a $h=1,3\text{m}$. En un primer registre preliminar s'ajusta la separació entre la filassa i la platina a $a=20\text{mm}$. S'encén la torxa i es regula la flama de forma que la zona groga-taronja embolcalli la platina, travessant les seves ranures; i estigui en contacte amb la filassa. S'augmenta la tensió fins que es produeixen descàrregues disruptives. Es registra la tensió disruptiva (valor mig de tres repeticions) i els oscil·logrames de tensió i corrent. Es fotografia en mode continu l'experiment.

L'experiment es repeteix, seguint els procediments anteriors, ajustant la separació entre la filassa i la platina en $a=220\text{mm}$ i després en $a=270\text{mm}$. Són valors associats a les distàncies mínimes d'aïllament elèctric per evitar descàrregues disruptives en línies aèries (D_{el}), especificats pel RLAT, per xarxes amb una tensió nominal de 20kV i 25kV respectivament [119]. La flama s'ajusta perquè ocupi aproximadament el 50% de la distància (a) abans d'aplicar tensió. L'experiment es repeteix amb la flama ocupant tot l'espai que separa la filassa i la platina.

3.2.4.4 Descripció, resultats i discussió

3.2.4.4.1 Anàlisi de la formació de les descàrregues

La formació de descàrregues disruptives durant l'experiment preliminar, amb la torxa de butà amb boca de $D=22\text{mm}$, es mostra a la Fig.3.20. En aquest experiment a l'augmentar la tensió i abans de la descàrrega, és audible un soroll d'eixam d'abelles. S'aprecia corona en el conductor i la formació de descàrregues parcials des de la platina. Evolucionen en la zona ionitzada per la flama.

Si es continua augmentant la tensió, des del conductor es produeix una descàrrega ramificada, de forma intempestiva. Va a buscar la zona ionitzada per la flama. Es produeix la ruptura i es forma un canal conductor ionitzat que uneix la filassa i la platina, propiciant un estadi de conducció contínua. Es forma l'arc, el corrent augmenta i la tensió disminueix, presentant la forma d'ona típica de l'arc.

Si l'experiment es repeteix sense flama la descàrrega es produeix, a una tensió superior, entre la filassa i l'extrem superior de la platina per l'efecte de punta. Posa de manifest que la presència de la flama, a més de disminuir la tensió disruptiva, condiciona el desenvolupament i geometria de la descàrrega, que busca el camí conductor de menor impedància. Per una determinada configuració geomètrica, la presència de la flama pot alterar el procés de descàrrega esperat.

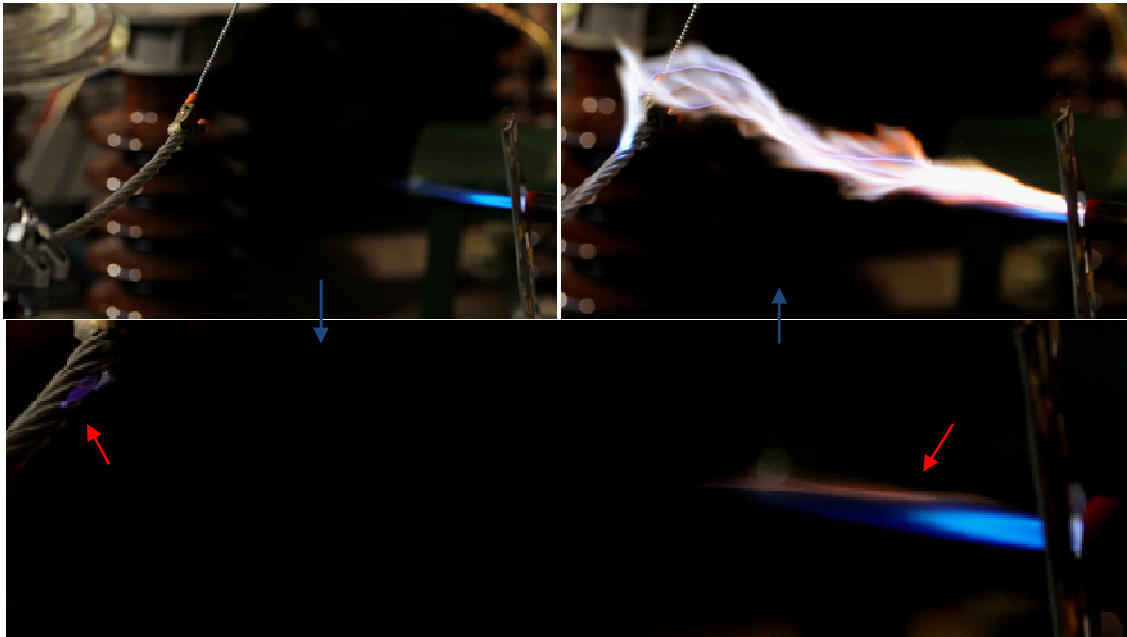


Fig.3.20 Descàrrega entre una filassa de Al i una platina d'acer amb flama de butà. (A.f. Martí, M.).

Quan s'utilitza la torxa de gas butà amb una boca de $D=50\text{mm}$, de forma que la zona groga-taronja de la flama ocupi aproximadament el 50% de l'espai, entre la filassa i el conductor, es manifesten fenòmens similars (v.Fig.3.21).



Fig.3.21 Descàrrega entre una filassa de Al i una platina amb flama de butà (50%). (A.f. Martí, M.)

S'observa que les descàrregues ramificades, que parteixen del conductor, s'introdueixen a les flames i es produeix la ruptura. El seu creixement és condicionat per l'evolució de les llengües de foc que es produeixen per l'oscil·lació de la flama.

Al mateix temps el camp electromagnètic influeix en la forma de les flames. Tot i que l'extrem de la flama és oscil·lant per naturalesa, s'ha observat que el contorn del cos visible de la flama tendeix a allunyar-se de la filassa i del canal ionitzat de la descàrrega. Presenta analogia amb les observacions realitzades en els experiments de l'explosor de banyes i l'explosor de Thiele.

Quan la flama ocupa la totalitat de l'espai que separa la filassa i la platina, apareixen descàrregues parcials en forma de filaments tortuosos. Evolucionen progressivament des de la filassa i la platina. La ruptura es produeix a una tensió inferior. L'arc es manifesta amb conducció contínua, augment del corrent, disminució de la tensió i distorsió de l'ona de tensió. El comportament és anàleg al que s'ha observat amb l'explosor de Thiele i s'ha exposat a l'apartat 3.2.3.4.2.

A la Fig.3.22 es mostra la formació dels filaments que inicien les descàrregues disruptives.

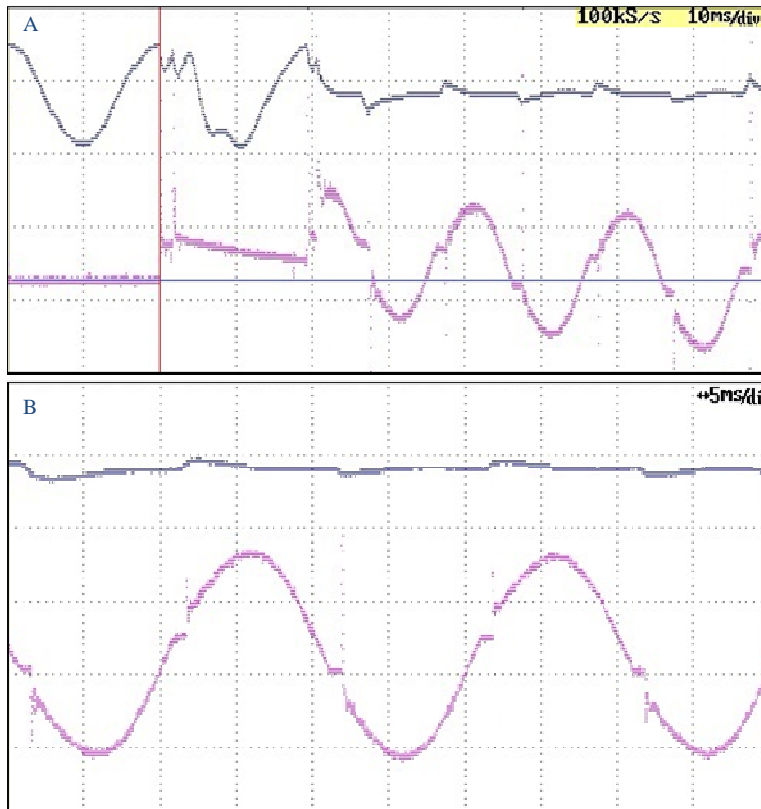


Fig.3.22 Descàrregues entre una filassa de Al i una platina en una flama de butà (A.f. Martí, M.).

D'altra banda, a la Fig.3.23 es mostren oscil·logrames de tensió i corrent, relatius a l'experiment on la flama ocupa el 100% de l'espai entre la filassa i la platina; i la separació s'ha ajustat a $a=20\text{mm}$.

Com s'havia vist i analitzat en experiments anteriors, s'observa que la ruptura es produeix en el semiperíode positiu (v. oscil·lograma A). Es produeix un transitori en el que la tensió es redueix i el corrent augmenta. L'ona de tensió presenta la forma característica de l'arc.

S'observa una tendència a produir-se una asimetria entre la conducció en el semiperíode positiu i en el semiperíode negatiu, durant el transitori proper a la ruptura. S'observa que els màxims de tensió són superiors al semiperíode positiu. Podria estar relacionat amb una major conductivitat durant el semiperíode positiu, deguda a les carregues elèctriques procedents del cos de la flama que té polaritat positiva. Posteriorment l'ona de corrent és simètrica, amb petites discontinuïtats en els passos per zero, associades als fenòmens d'extinció i reencesa de l'arc (v. oscil·lograma B).



Oscil·logrames:
Superior/blau: tensió.
Inferior/lila: corrent

A: Flama butà ($a=20\text{mm}$, $h=1,3\text{m}$);
 $U_D=6,2\text{kV}$; $U_{ef}=1,62\text{kV}$;
 $I=82\text{mA/div}$; 10ms/div

B: Flama butà ($a=20\text{mm}$, $h=1,3\text{m}$);
 $U_{ef}=1,63\text{kV}$, $I_{ef}=82\text{mA}$; 5ms/div

Fig.3.23 Oscil·logrames relatius a l'experiment de descàrrega entre una filassa de Al i una platina.

3.2.4.4.2 Anàlisi de la tensió disruptiva en relació amb una línia de MT

Els resultats pels casos en que $a=220\text{mm}$ (associat a la distància d'aïllament elèctric mínima per evitar descàrregues en una línia de $U_N=20\text{kV}$) i $a=270\text{mm}$ (associat a una línia de $U_N=25\text{kV}$), es presenten a la Taula 3.1.

S'observa que les tensions disruptives augmenten a l'augmentar la distància de separació entre filassa i platina (a). També que són de l'ordre d'un 30-35% superiors quan la flama només ocupa el 50% del forat.

Separació filassa-platina (a)	Flama (ocupa 50% de (a) aprox.)	Flama (ocupa 100% de (a))
	Tensió disruptiva (cresta)	Tensió disruptiva (cresta)
220mm	49kV	34kV
270mm	67kV	45kV

Taula 3.1 Tensions disruptives (cresta) entre la filassa i la platina ranurada en presència de flames.

Els valors de la tensió disruptiva quan la flama ocupa tot el forat, corresponen a un gradient de l'ordre de $155\text{-}166\text{kV/m}$. És de l'ordre de magnitud dels gradients obtinguts en l'estudi de Pu, et al. [106]; ($150\text{kV-}218\text{kV/m}$), relatius a un experiment realitzat entre dos conductors afectats per les

flames procedents de la combustió de troncs de pi⁴⁹. El rang de tensions i separació entre conductors és similar. Tot i que en aquest estudi les flames ascendeixen verticalment, s'ha observat en els experiments amb l'explosor de Thiele, que aquest no és un factor que alteri significativament els resultats. La temperatura de les flames és d'un ordre de magnitud similar. Durant la combustió i piròlisi de la fusta de pi, es generen productes similars als de la combustió incompleta d'hidrocarburs, descrits a l'apartat 3.2.2.2. Per exemple: H₂O, CO₂, CO, CH₄, fenols, aldehids, acetats, parafines, etc [121].

No obstant, són significativament superiors als gradients obtinguts en estudis amb tensions superiors i flames procedents de la combustió de vegetals, amb alt contingut de cendres i partícules conductores; com per exemple l'estudi de Fonseca, et al. [104], que obté 35kV/m. La combustió d'un nombre reduït de troncs de pi en el laboratori, no genera el volum de cendres i partícules conductores que poden contenir les flames en un incendi forestal real. En l'estudi de Pu, et al. [106], s'afegeix un 1% de la massa de la fusta de clorur de potassi (KCl) per augmentar la conductivitat de les flames i copsar la diferència. S'obtenen reduccions de les tensions disruptives de l'ordre del 30%. El contingut en cendres i partícules conductores procedents de la combustió, disminueix significativament la tensió disruptiva i és rellevant a l'hora de determinar gradients.

La vegetació té un alt contingut en minerals com el potassi, que es manifesten en les cendres i partícules conductores que contenen les flames d'un incendi forestal real. Un estudi recent exposa l'estat de l'art sobre l'estudi de la composició de les cendres procedents de la biomassa [122]. Efectivament contenen KCl, però també molts altres compostos conductors que poden influir. Poden ser diferents en funció del tipus de arbres i vegetació de l'entorn. D'altra banda, un incendi industrial, com el de les peces de polièster i fibra de vidre que s'ha exposat al principi del capítol, pot contaminar les flames amb partícules conductores diferents. Amb presència de partícules el camp elèctric entre els elèctrodes, pot experimentar forts increments puntuals, atès que es formen "punts triples", en les fronteres aire o flama-electròde-partícula.

Cada casuística pot tenir associades unes tensions disruptives significativament diferents. Cal una caracterització del tipus i contingut d'aquestes partícules en les flames de cada tipus d'incendi; i una metodologia per introduir-les adequadament a les flames generades en el laboratori, per obtenir resultats adaptats a cada cas.

No obstant, els valors obtinguts es poden utilitzar com una cota superior de referència. En un incendi real és d'esperar que els gradients siguin significativament inferiors, per la contaminació de les flames amb cendres i una concentració superior de partícules conductores. En una línia de U_N=20kV, la tensió de pic associada a la màxima tensió eficaç de la línia (U_s=24kV), és de U_p=33,6kV⁵⁰. Per una línia de U_N=25kV (U_s=30kV), és de U_p=42,4kV. Aquest valors de U_p, són de l'ordre de magnitud de les tensions disruptives indicades a la Taula 3.1, tot i que se situen lleugerament per sota (34kV>33,6kV i 45kV>42,4kV).

⁴⁹ Les flames ascendeixen verticalment des d'un foc generat amb troncs de pi sota els conductors. Les flames ocupen tot l'espai entre els conductors. Els gradients corresponen a un rang de separació entre elèctrodes de 240-285mm.

⁵⁰ Considerant una ona de tensió sinusoidal simètrica.

Si s'aplica una reducció moderada del 25% dels valors obtinguts, per l'efecte de les cendres, tan U_N com U_s porten a la ruptura, quan la filassa i un cos metàl·lic a potencial terra entren en contacte a través del foc (separats per la distància mínima d'aïllament elèctric per evitar descàrregues (D_{el}) definida pel RLAT).

3.2.4.4.3 Rastres de l'arc sobre conductors i ferramentes

Tot i que els corrents d'arc dels experiments realitzats són reduïts (de l'ordre de 50-120mA), es troben petites marques de l'arc en la filassa i la platina d'acer al finalitzar l'experiment. Es mostren alguns exemples a la Fig.3.24.

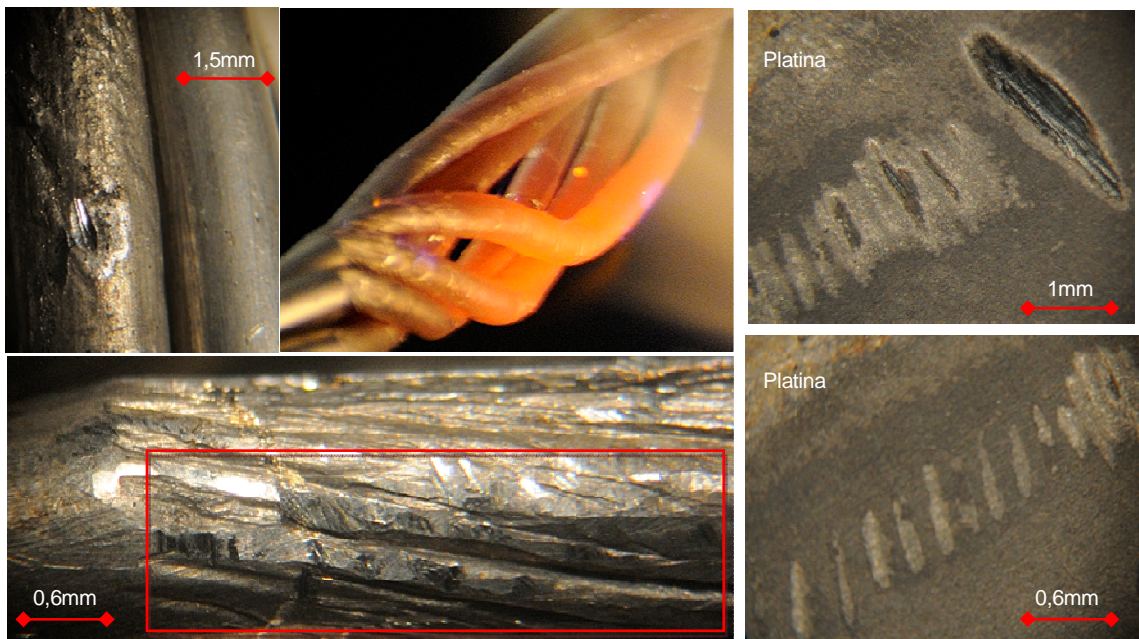


Fig.3.24 (a) Rastres de l'arc i el foc en la filassa de Al després de l'experiment. (b) Rastres de l'arc en la platina d'acer després de l'experiment. (A.f. Martí, M.).

S'observa que inclús quan un tram de filassa s'ha escalfat fins a la incandescència i posteriorment s'han realitzat descàrregues disruptives en forma d'arc, han sobreviscut marques de l'arc sobre els fils d'alumini aliat un cop s'han refredat. Aquestes marques senyalen els punts d'emissió termoiónica i la seva trajectòria. També són visibles diferents reenceses. En funció de la temperatura i del temps que els conductors i cossos metàl·lics connectats a terra siguin sotmesos a l'acció de les flames, aquestes marques poden sobreviure a l'incendi i tenir un valor forense.

Capítol 4. Conclusions i futures línies d'investigació

4.1 Conclusió global

La recerca experimental en l'àmbit de l'incendi d'origen elèctric és un espai en el que encara resten moltes aportacions per realitzar. Aquesta tasca pot contribuir a prevenir incendis i limitar el seus efectes. S'ha demostrat estadísticament que generen danys materials, personals i en ocasions ambientals, rellevants. Una recollida de dades sistemàtica, pública i realitzada per personal format, pot contribuir a millorar les estadístiques, que encara presenten un grau alt d'indeterminació i incerteses. Permetria establir unes línies de recerca prioritàries, amb la finalitat de centrar els esforços de recerca en les casuístiques i fonts d'ignició que generen un major nombre de danys personals i materials.

La docència en aquest àmbit també pot contribuir a augmentar la seguretat. D'una banda, la formació específica dels tècnics que dissenyen i munten les instal·lacions elèctriques, els pot permetre tenir en consideració factors que redueixin els riscos, durant l'exercici de la seva professió. D'altra banda, pot atreure futurs investigadors que contribueixin a la recerca.

L'ejecció d'espurnes originada per la circulació de corrents forts i l'arc de separació, és un dels temes poc estudiats. S'han il·lustrat alguns dels seus efectes, des d'una perspectiva experimental de laboratori electrotècnic de baixa tensió. Els experiments realitzats poden realitzar-se de forma econòmica amb una finalitat docent.

S'ha observat que una circulació de corrent fort entre elèctrodes i una massa d'alumini, genera l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes. Hi poden contribuir l'elevació de la temperatura produïda pel curtcircuit i l'arc de separació, els moviments ocasionats pels esforços electrodinàmics i els camps electromagnètics locals. Es produeix una pluja de partícules d'alumini que volen en combustió o incandescent durant segons a una temperatura molt elevada. Poden donar lloc a la ignició de materials fàcilment inflamables si hi entren en contacte. La quantitat de massa ejectada s'ha observat que varia en funció de l'instant de la senoide en que es produeix el curtcircuit. Quan els corrents i temps de curtcircuit són elevats, l'ejecció d'espurnes és superior. La limitació del corrent i temps de curtcircuit realitzada per les proteccions elèctriques, contribueix a reduir l'ejecció de partícules.

Els contactes accidentals entre conductors actius i un conducte de ventilació o aire condicionat amb una superfície d'alumini, s'ha observat que donen lloc a l'ejecció de partícules d'alumini en combustió o incandescent. La circulació forçada d'aire pot incrementar la dispersió de les partícules. La proximitat o contacte de cables elèctrics i connexions amb aquests conductes, pot provocar-ho, si per exemple es deterioren els seus aïllaments. És un factor que pot augmentar el risc d'incendi. En cas d'incendi originat per una altra causa, la destrucció dels aïllaments pot donar lloc a aquesta casuística i actuar com a factor propagador o accelerant.

Els incendis també afecten a les instal·lacions elèctriques. Destruïxen o deterioren els aïllaments i disminueixen la rigidesa dielèctrica de l'aire. Per aquests motius es produeixen corrents forts de curtcircuit o derivació a terra; i arcs elèctrics secundaris, a les instal·lacions afectades pel foc o els fums. Els arcs secundaris sovint deixen uns rastres similars als arcs primaris que originen els incendis. Introdueixen un graó afegit de dificultat a l'hora de determinar les seves causes. En alguns casos poden tenir un efecte propagador o accelerant del mateix. Aquesta casuística acostuma a provocar el dispar de les proteccions elèctriques, pel que afecta al subministrament d'energia.

En el cas de línies aèries d'alta tensió de transport o distribució, es produeixen descàrregues violentes entre conductors o entre conductors i masses. Poden provocar dispars intempestius de les proteccions, que comportin pertorbacions o talls de subministrament en zones allunyades de l'incendi. Si després de l'incendi no es realitza un manteniment adequat dels components afectats pel foc, pot incrementar el risc de defectes futurs.

S'han il·lustrat i analitzat alguns dels efectes dels fenòmens de descàrrega elèctrica en un gas en presència de foc, mitjançant experiments de laboratori electrotècnic d'alta tensió amb corrents reduïts. Poden tenir una aplicació docent.

S'ha observat que el camp elèctric interacciona amb les flames i provoca un canvi de la seva geometria. Els cos lluminós de les flames és ric en càrregues elèctriques i té polaritat positiva. La rigidesa dielèctrica de l'aire i la tensió disruptiva disminueix en presència de flames. És a causa de l'augment de la temperatura, però també influeix la polaritat (CC) o canvi de polaritat (CA) del sistema elèctric i les partícules conductores que es desprenen durant l'incendi.

S'ha observat que les descàrregues tenen tendència a produir-se en el semiperíode positiu en presència de foc. Tendeixen a seguir camins dins, o en la perifèria, de l'espai ionitzat pel foc. La direcció de les flames pot influir en la forma de les descàrregues. S'ha observat que la tensió disruptiva pot disminuir a valors inferiors al 20% de la tensió disruptiva en condicions normals. En línies aèries de MT i AT, la rigidesa dielèctrica pot disminuir suficientment com perquè, amb les distàncies mínimes de seguretat reglamentàries, es produeixin descàrregues disruptives.

Per realitzar una millor aproximació al fenomen real, pot ajudar estudiar les concentracions i tipus de partícules conductores presents a les flames de diferents tipus d'incendis, per reproduir-ho al laboratori. Treballar amb corrents de curtcircuits superiors, que poden afectar al comportament de l'arc i els efectes produïts per les descàrregues, també hi contribuiria.

Els defectes en les instal·lacions elèctriques poden originar incendis. Els incendis poden originar defectes en les instal·lacions elèctriques. Aquests defectes víctimes o secundaris, no només afecten al seu funcionament, sinó que poden contribuir a propagar o accelerar l'incendi. La relació entre l'electricitat i el foc, pot constituir una disciplina de recerca i docència que sigui abordada amb una visió de conjunt en ambdues direccions.

4.2 Conclusions parcials i aportacions per capítols

4.2.1 Conclusions i aportacions del capítol 1

La bibliografia especialitzada sobre els incendis d'origen elèctric és escassa. No es troben publicacions científiques específiques, escrites en anglès o llengües llatines, que englobin aquesta temàtica de recerca. Generalment els articles i treballs experimentals sobre el tema es troben publicats de forma dispersa. En els congressos internacionals sobre la ciència del foc i l'electrotècnia, es presenten treballs sobre la temàtica, però no s'ha trobat un espai específic. Sembla que no existeixen unes línies de recerca prioritàries clares establertes internacionalment. Tampoc és abundant el material didàctic disponible ni està estesa la seva aplicació docent. Per il·lustrar el capítol, s'han presentat petits experiments, generalment econòmics i d'execució senzilla, que poden ajudar en aquest sentit.

No obstant, està estadísticament comprovat que els incendis d'origen elèctric ocasionen un nombre mínim de sinistres, danys a les persones i pèrdues econòmiques suficients, com per justificar la recerca en aquest àmbit. Són rellevants en l'àmbit dels edificis, els entorns forestals i agrícoles i els vehicles.

Els estudis estadístics sobre els incendis d'origen elèctric i les seves fonts d'ignició, encara no estan suficientment desenvolupats, inclús en els països més avançats en aquest àmbit. El nombre de sinistres d'origen desconegut, fan difícil calibrar exactament quina és la incidència real de l'incendi d'origen elèctric. No existeixen estudis estadístics que englobin tots els incendis d'origen elèctric en un mateix document. Als EUA, més del 75% dels incendis d'origen elèctric registrats en edificis durant els darrers anys, tenen una font d'ignició elèctrica indeterminada. Això dificulta establir quines són realment les fonts d'ignició estadísticament més rellevants, per orientar la recerca i la prevenció. A Catalunya, s'està treballant en adaptar els procediments de la NFPA per realitzar una recollida de dades sistemàtica, des del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya.

Els estudis estadístics realitzats als EUA, indiquen que l'arc elèctric és la principal font d'ignició elèctrica en els edificis, en els casos on s'ha pogut registrar la font d'ignició. No obstant, en general no es concreta quins tipus de descàrrega es produeix i l'estadística requereix força interpretació i realitzar hipòtesis. D'altra banda, la sobrecàrrega en extensions amb endolls múltiples és un dels problemes rellevants de seguretat elèctrica a l'habitatge, segons diversos investigadors i estudis. Les casuístiques associades als contactes d'elevada resistència i la degradació dels aïllaments per descàrregues sobre pistes conductores, també semblen tenir una incidència rellevant. En aquest sentit el disseny dels formularis de recollida de dades, la formació tècnica elèctrica dels equips que recullen la informació o l'associació amb experts en la matèria, és un factor rellevant perquè les estadístiques puguin ser representatives.

La generació d'arcs elèctrics secundaris posteriors a l'inici dels incendis, deguda a la degradació i carbonització dels aïllaments i a la disminució dielèctrica de l'ambient, és molt comuna. Els arcs secundaris deixen rastres amb aspecte molt similar, als que s'hagin pogut produir abans de l'incendi. Existeixen tècniques i metodologies per diferenciar-los, però no són sempre determinants

o no està reconeguda la seva validesa científica. Això pot generar indeterminació i la possibilitat de confondre aquests arcs entre ells. Dificulta la investigació per determinar la causa dels incendis i l'elaboració d'estadístiques.

Els arcs de separació, encara que siguin de reduïda potència, poden produir la ignició de materials fàcilment inflamables. Petites descàrregues elèctriques en un mal contacte, poden donar lloc a sobreescalfaments que no són normalment detectats per les proteccions elèctriques. Poden degradar els aïllaments i conduir a la ignició. L'arc sèrie és una casuística particularment difícil de detectar i que no dispara les proteccions convencionals. Genera una distorsió harmònica del corrent, però no és fàcilment distingible de la produïda per altres fonts generadores d'harmònics, presents avui en dia a moltes instal·lacions. Les connexions i el seu entorn, són una zona crítica en relació amb la ignició elèctrica.

L'ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric, com a mecanisme d'ignició elèctrica, ha estat poc estudiada experimentalment. Tot i que les estadístiques disponibles no la situen com la principal causa d'ignició registrada als edificis, és una font d'ignició que es manifesta de forma habitual associada al curtcircuit i a l'arc. L'alt grau d'indeterminació de les estadístiques fa difícil establir quin és el seu abast real.

Les descàrregues per pistes conductores poden succeir en sistemes de AT i també a tensions molt reduïdes. És un problema que es té en consideració en el disseny de cables, sotmesos a assajos específics, en la indústria aeronàutica, automobilística i en els sistemes de AT. Alguns estudis senyalen que els aïllaments de PVC quan se sobreescalfen són propensos aquest fenomen. Els aïllaments de PVC són molt comuns en les instal·lacions interiors dels edificis i habitatges. Els rastres d'aquest fenomen acostumen a ser eliminats per les flames dels incendis. S'intueix que pot tenir una incidència estadística notable en aquest àmbit, però no està comprovada.

El sobreescalfament per sobrecàrrega és una font d'ignició que pot ser previnguda, en bona mesura, mitjançant un correcte dimensionament dels conductors i les proteccions. També cal un posterior manteniment adequat. En aquest sentit és més senzill reduir la seva incidència que la dels arcs. La situació de seccions insuficients, ampliacions realitzades per no professionals i manca de proteccions a un percentatge molt significatiu dels habitatges d'Espanya, produeix una situació de risc d'ignició elèctrica que podria ser mitigable. La situació és especialment crítica en les instal·lacions antigues.

L'increment dels desequilibris de corrent en les línies trifàsiques que alimenten edificis i indústries, a causa de la presència de càrregues que introdueixen distorsions harmòniques, ha propiciat un increment de la circulació de corrent pels conductors de neutre. Alguns tècnics i instal·ladors encara associen el neutre amb un conductor pel que hi circula poc corrent. El dimensionament dels conductors de neutre ha de tenir present aquesta circumstància i és rellevant mantenir el bon estat de les seves connexions. La sobrecàrrega de conductors i l'oxidació de les connexions del neutre, ocasionades per un contacte de resistència elevada, són factors que poden relacionar-se amb la ignició elèctrica. Les sobretensions permanents produïdes per la interrupció del neutre també és un

factor de risc, especialment mentre les proteccions contra sobretensions permanents no tinguin una presència generalitzada a totes les instal·lacions.

Les descàrregues capacitives ocasionades per l'electricitat estàtica són comunes. Diversos mecanismes de descàrrega capacitiva causats per l'electricitat estàtica, poden produir la ignició elèctrica de materials fàcilment inflamables. Existeix legislació internacional, i en particular a Espanya, per prevenir aquests sinistres en instal·lacions en entorns amb risc d'explosió o fàcilment inflamables. En aquests entorns també s'apliquen mecanismes de prevenció específics. No obstant, no està estadísticament comprovada quina pugui ser la seva incidència en els incendis d'origen elèctric en edificis en general i en els habitatges.

La possibilitat d'ignició espontània en instal·lacions elèctriques en edificis, deguda a sobreescalfaments produïts per inducció electromagnètica, no està explorada ni existeixen gaires referències bibliogràfiques sobre la temàtica. La seva incidència estadística tampoc està registrada.

Recentment sembla que s'ha trobat la causa per la que s'inflamen i exploten les bateries d'ions de liti. Actualment existeix recerca activa per mitigar aquest problema, que afecta equipaments electrònics i a la indústria dels vehicles elèctrics. D'altra banda, també s'acaba de presentar una bateria d'alumini d'alta capacitat, recàrrega ultraràpida i no inflamable, segons els seus desenvolupadors, que pot substituir-les en el futur. La casuística d'ejecció d'espurnes d'alumini en cas d'arc elèctric pot tenir-hi alguna implicació. D'altra banda, les explosions d'hidrogen degudes a la hidròlisi en bateries de plom àcid, representa un risc d'incendi a tenir en consideració. Especialment en instal·lacions solars fotovoltaïques amb les bateries confinades en espais poc ventilats.

En els sistemes de potència de BT, els efectes dels defectes elèctrics i les conseqüències dels incendis associats són més severes que ens circuits de reduïda potència. No obstant, es troba poca recerca activa sobre incendis en instal·lacions trifàsiques de potència industrials. Aquests sistemes generalment treballen a una tensió de 400V, el que per exemple, pot comportar una casuística de descàrregues elèctriques i arcs diferent que a 230V.

Tot i que una àmplia majoria dels incendis es produeixen en sistemes de BT, els incendis en instal·lacions de MT i AT també causen danys i pèrdues significatives. En particular els incendis forestals produïts per línies aèries, a més, poden tenir impactes ambientals severos. És un àmbit en el que existeix poca recerca pública accessible específica. La majoria de treballs que es poden trobar tracten sobre explosions de transformadors, incendis en galeries subterrànies, explosions en interruptors i cel·les d'estacions transformadores; i trencaments d'empuladures o contactes entre conductors, ocasionats pel vent en línies aèries d'alta tensió.

4.2.2 Conclusions i aportacions del capítol 2

Els experiments realitzats amb conductes tubulars fabricats amb alumini i panells utilitzats en la fabricació de conductes d'aire condicionat recoberts d'alumini, posen de manifest que una circulació de corrent fort subtransitori, entre elèctrodes de coure i una superfície d'alumini, dona lloc a l'ejecció d'una gran quantitat d'espurnes d'alumini en combustió o incandescent i algunes de coure incandescent.

Es produeixen efectes electrodinàmics i fusió de material, que afavoreixen el desenvolupament de l'arc de separació. Té lloc una explosió en la que es produeixen flames, amb una duració de l'ordre d'una desena de milisegons. També es produeix una pluja de partícules d'alumini que volen a una temperatura molt elevada durant segons (pot ser de l'ordre de 3200°C, durant la combustió de l'alumini). S'han observat efectes de transició, com per exemple la formació de diverses espurnes a partir d'una de sola o l'entrada en combustió d'una partícula que volava calenta o incandescent. En el cas de circulació forçada d'aire, la seva projecció espacial augmenta i es pot afavorir la combustió per l'efecte de l'aire com agent oxidant. El confinament també pot augmentar els riscos.

Les partícules poden impactar contra superfícies o el terra; i mantenir-s'hi durant segons en combustió, incandescents o calentes. Si entren en contacte amb materials fàcilment inflamables, poden tenir l'habilitat de produir una ignició d'origen elèctric i convertir-se en focus d'incendi. En el cas que provenguin d'arcs secundaris posteriors a l'inici d'un incendi, poden actuar com a propagadores, generant focus secundaris, o acceleradores del mateix.

En l'estudi dels panells s'ha observat, que en alguns casos, pot produir-se una flama de petites dimensions que afecta al paper i l'aïllament que es troba sota la làmina d'alumini. Tot i que s'extingeix espontàniament en pocs segons, podria augmentar el risc d'incendi associat a l'ejecció d'espurnes, en presència de combustibles, amb condicions favorables. Es fabriquen panells incombustibles que poden mitigar aquest efecte. Si existeixen contaminants metàl·lics que puguin donar lloc a reaccions exotèrmiques aluminotèrmiques automantingudes, els riscos podrien augmentar.

S'ha observat que l'ejecció de partícules és variable en funció del punt de la senoide de tensió en el que es produeix el curtcircuit. Els curtcircuits amb major corrent i duració produeixen una major quantitat d'espurnes. S'ha realitzat una aproximació a la quantificació de la massa i superfície de material ejectat. Les proteccions amb temps d'actuació més ràpids, limiten en major mesura la quantitat de material ejectat. En alguns casos s'ha observat que el moviment relatiu entre elèctrodes, produït pels efectes electrodinàmics, pot produir una seqüència de curtcircuits si les proteccions no actuen. Els contactes accidentals augmenten la quantitat d'espurnes ejectades, respecte quan el curtcircuit es produeix fixant l'elèctrode. En diversos assajos la interrupció del corrent en el pas per zero, ha comportat una limitació de l'ejecció d'espurnes. El nivell de tensió eficaç de 400V, augmenta el nombre d'experiments en el que es produeix una ejecció d'espurnes elevada. Un major nivell de tensió pot afavorir el desenvolupament de l'arc de separació i podria incrementar l'ejecció d'espurnes.

Als reglaments de referència que se segueixen per implementar instal·lacions als edificis, no hi ha una menció específica a les distàncies que cal mantenir entre conductes de ventilació o aire condicionat fabricats o recoberts d'alumini i les canalitzacions o conductors elèctrics. Si aquestes instal·lacions es troben properes augmenta el risc que es produeixi aquesta casuística. En cas d'incendi, es pot produir la destrucció de les canalitzacions i una pèrdua de les propietats aïllants del cable per l'acció de les flames. Si els conductors entren en contacte amb els conductes, la pluja d'espurnes pot generar focus d'incendi secundaris, contribuir a elevar la temperatura i a propagar o accelerar el foc. El desplaçament de l'arc per l'espai ionitzat per l'incendi també pot contribuir-hi. Podria haver actuat com a element propagador o accelerant de l'incendi en el sinistre aportat pels Bombers de la Generalitat de Catalunya, que s'ha descrit a l'inici del capítol.

Una reglamentació o ordenances que prohibeixin explícitament l'estesa de conductors sobre els conductes de ventilació i aire condicionat amb superfície d'alumini, ajudarien a reduir aquests riscos i augmentar la seguretat. L'increment de les distàncies mínimes associades als paral·lelismes i creuaments, entre conductors elèctrics i aquest tipus de conductes, també podria contribuir-hi.

A nivell constructiu, es podria suggerir que quan les canalitzacions fossin de materials plàstics es muntés una cinta metàl·lica a la seva perifèria exterior, col·locada en llocs estratègics i connectada a terra. Provocaria el disparar de les proteccions diferencials abans de produir-se l'ejecció d'espurnes. No representaria un increment de costos elevat. En el cas de canalitzacions metàl·liques, una correcta connexió a terra de les mateixes tindria el mateix efecte. D'altra banda, el recobriment amb material aïllant de la superfície exterior dels conductes impediria en moltes situacions, que es pogués produir un contacte accidental i l'ejecció d'espurnes. Un dimensionament adequat i un correcte manteniment de les proteccions elèctriques també hi contribuiria.

D'altra banda, la formació dels instal·ladors en aquest àmbit, pot comportar que incrementin les precaucions a l'hora d'executar les instal·lacions. Pot contribuir a reduir els riscos i augmentar la seguretat de les instal·lacions en els edificis i les indústries.

4.2.3 Conclusions i aportacions del capítol 3

Les flames i el fum disminueixen la rigidesa dielèctrica de l'aire significativament. Afecta als sistemes elèctrics involucrats en un incendi. Pot ser crític en les instal·lacions de AT amb conductors nus, perquè l'aïllament està basat en establir distàncies de seguretat calculades a partir de la rigidesa dielèctrica del medi. Per exemple és el cas de les línies aèries de MT i AT. Encara que en el seu càlcul s'hagin tingut en compte factors que disminueixen la tensió disruptiva com la pol·lució, la contaminació ambiental, la humitat, etc; no es dimensionen en funció de l'efecte de l'acció de les flames d'un incendi.

Quan l'acció de les flames afecta a una línia aèria de MT o AT, poden produir-se descàrregues disruptives i fenòmens de combustió sobtada a la línia. Han estat observades pels Bombers de la Generalitat de Catalunya i en altres països. Per exemple, a Espanya i a Catalunya, les distàncies d'aïllament dielèctric mínimes per evitar descàrregues especificades pel RLAT i les associades a la

regulació de les podes en les zones de servitud per evitar incendis, no eviten que les flames d'un incendi forestal puguin assolir una línia aèria de segona categoria.

Quan les descàrregues es produeixen de forma intempestiva, poden ocasionar talls de subministrament elèctric imprevistos. Existeixen algunes publicacions que senyalen i estudien aquest problema, en àmbits agrícoles i forestals en diferents zones del món. En entorns industrials també són factibles. A més comporten un risc pels equips d'extinció i poden tenir un efecte propagador de l'incendi generant focus secundaris (en funció de múltiples factors com la magnitud de l'incendi o la velocitat de l'arc, entre d'altres).

Després de l'incendi dificulten els peritatges. És difícil discernir quins arcs s'han produït abans del foc i poden ser-ne causa; i quins en són una conseqüència, en forma d'arcs secundaris sense rellevància o amb un possible efecte propagador. Una altra derivada posterior a l'incendi, és que poden contaminar els aïlladors amb partícules conductores, facilitant que es produeixi ruptura si no s'actua preventivament.

La disminució de les tensions disruptives produïda pels incendis, no pot explicar-se només per la variació de la densitat de l'aire, ocasionada per l'increment de la temperatura. El cos d'una flama no és elèctricament neutre, sinó que és ric en càrregues elèctriques i té polaritat positiva. La polaritat (en CC) o la variació de polaritat (en CA) de la xarxa, influeix en la disminució de les tensions disruptives i els processos de descàrrega. La concentració de cendres i partícules conductores produïdes durant la combustió, també augmenta significativament la conductivitat del medi i de les flames, disminuint la tensió disruptiva en presència de foc. Actuen com baules de cadenes conductores, que uneixen un conductor amb un altre o amb un cos connectat a potencial terra. La variació de la forma de les flames produïda pel camp elèctric, també pot influir i condicionar la trajectòria de les descàrregues.

L'experiment de l'explosor de banyes amb flama d'espelma que s'ha presentat, és d'aplicació docent perquè permet il·lustrar de forma econòmica i senzilla, molts dels efectes relacionats amb aquesta casuística. La flama procedent de la piròlisi de la parafina, té unes característiques de temperatura, comportament; i genera uns productes de combustió, similars als que es donen en diversos tipus d'incendi. L'espelma pot ser substituïda per una torxa de gas, per experimentar amb altres tipus de flames procedents de la combustió completa o incompleta d'hidrocarburs. La flama groga-taronja procedent d'una combustió incompleta, s'assimila més a les que es produeixen en molts incendis.

L'experiment amb l'explosor de Thiele amb elèctrodes refrigerats que s'ha presentat, també pot ser d'aplicació docent. La refrigeració dels elèctrodes permet introduir flames de major volum, durant més temps i des de trajectòries diferents, sense distorsionar els efectes observats i els resultats obtinguts.

El camp elèctric entre dos elèctrodes als que s'aplica AT en CA, s'ha observat que modifica la forma de les flames, procedents de l'espelma i de la combustió incompleta d'hidrocarburs. També produeix moviment i oscil·lació del seu cos lluminós. En general és atret per l'elèctrode amb

polaritat negativa. L'efecte es pot explicar per la interacció del camp elèctric amb les càrregues elèctriques i partícules conductores diamagnètiques del seu cos. Al mateix temps, la forma i oscil·lació de les flames, pot influir en l'evolució de les descàrregues parcials i disruptives entre els elèctrodes.

Les descàrregues es produeixen en l'espai ionitzat per les flames, buscant el camí de mínima impedància. Si la flama ocupa tot l'espai entre els dos elèctrodes, es produeixen descàrregues parcials que van creixent a dins la flama fins que es produeixen descàrregues disruptives. Si ocupa una part de l'espai, des de l'elèctrode afectat per les flames es produeixen descàrregues parcials en l'interior o la perifèria del foc. En l'altre elèctrode eventualment apareix corona. A l'augmentar la tensió, arriba un moment en que de forma abrupta apareix una descàrrega, habitualment ramificada, que assoleix les flames. Es forma un canal ionitzat conductor que uneix els elèctrodes i la descàrrega evoluciona cap a l'arc. Es manifesta amb un augment del corrent i una disminució de la tensió, així com la distorsió de la seva forma d'ona característica.

Quan les flames són emeses en una determinada direcció i les seves partícules tenen una certa velocitat, les descàrregues neixen seguint la trajectòria de la flama pel desplaçament dels seus ions. Un cop s'han produït, creixen i es desplacen preferentment a dins de la flama o en la seva perifèria. No s'ha observat que la direcció o sentit de les flames variï significativament la tensió disruptiva.

Els experiments posen de manifest que la tensió disruptiva entre dos elèctrodes, en presència de flames, és significativament inferior a la que s'obté quan no hi ha flames. Disminueix amb la disminució de la distància entre la flama i els elèctrodes linealment. Els pendents de les rectes amb foc són inferiors al pendent de la recta que s'obté sense foc. Amb tensions i distàncies d'aïllament grans, els valors absoluts de reducció de la tensió disruptiva són superiors.

Les tensions disruptives disminueixen a valors de l'ordre de fins al 20% del valor de la tensió disruptiva en absència de flama, en l'experiment amb l'explosor de banyes i quan la flama de l'espelma ocupa tot l'espai entre els elèctrodes. Disminueixen a valors de l'ordre del 7-10% en l'experiment de l'explosor de Thiele, quan els elèctrodes refrigerats entren en contacte a través d'una flama blava procedent d'una bona combustió del butà; i del 12-15% en la zona groga-taronja, de combustió incompleta.

S'ha observat que la ruptura en condicions de foc es produeix preferentment en el semiperíode positiu de la tensió. Es relaciona amb la polaritat positiva de les flames. Durant el semiperíode positiu els electrons procedents de la flama és més fàcil que siguin capturats per l'elèctrode. Intensifica el camp elèctric, afavoreix l'increment de velocitat dels electrons, la formació de l'arc i la conducció elèctrica.

En alguns experiments s'ha observat una tendència a produir-se una asimetria transitòria en l'ona de corrent, que presenta uns màxims superiors en el semiperíode positiu. També podria estar relacionat amb la polaritat de la flama. En corrent altern, després d'un transitori, la circulació de corrent d'arc a través de les flames és sinusoidal i força simètrica. Es produeixen petites discontinuïtats a prop del pas per zero, a causa de l'extinció i reencesa de l'arc. En condicions de

foc, la regeneració dielèctrica del medi és molt difícil. Un cop s'ha establert l'arc d'emissió termoiònica, s'ha observat que es produeix conducció contínua en l'interior o la perifèria de les flames.

D'altra banda, s'ha trobat un rang de tensions de l'ordre del 20-30% inferiors a la tensió disruptiva, en el que es produeixen descàrregues parcials; i eventualment disruptives generant conducció discontinua de duració breu. Habitualment inferior a un semiperíode. Es produeixen preferentment en el semiperíode positiu. Aquesta conducció no presenta les característiques de l'arc.

S'ha simulat el comportament i característiques de descàrregues produïdes entre els conductors d'una línia aèria de MT i un cos a potencial terra, en presència de flames turbulentes procedents de la combustió incompleta de gas butà. El muntatge pot tenir una aplicació docent per il·lustrar aquesta casuística, de forma pràctica i relativament senzilla.

S'han obtingut uns gradients de tensió de l'ordre de 155-166kV/m, amb distàncies de separació entre la filassa i el cos a potencial terra de 220 i 270mm (les mínimes que eviten descàrregues entre conductors i cossos a potencial terra, en línies aèries de 20kV i 25kV respectivament, segons el RLAT). En un incendi real és d'esperar que aquests gradients siguin inferiors, per l'important efecte reductor de la tensió disruptiva produït per les cendres i partícules conductores presents a les flames. Ha estat senyalat en algunes publicacions, tot i que existeix una àmplia dispersió en els seus valors experimentals. Les tensions disruptives obtingudes se situen lleugerament per sota de la tensió de pic d'aquestes línies. Se situen per sobre si s'apliquen factors de reducció conservadors, associats a l'efecte de les cendres i basats en altres estudis.

Els gradients obtinguts són una aproximació que pot funcionar com a punt de referència superior. Per obtenir valors més ajustats a cada cas, caldria caracteritzar la concentració i composició de les partícules conductores presents en cada tipologia d'incendi relacionat amb línies aèries. Posteriorment s'hauria d'aplicar una metodologia per reproduir les flames en conseqüència. D'altra banda, una major capacitat de generació de corrent d'arc de l'equipament d'assaig utilitzat, també hauria de ser considerada per aproximar-se encara més al fenomen real.

4.3 Futures línies d'investigació i d'aplicació

4.3.1 Estat de l'art de l'incendi d'origen elèctric

A partir de la recerca bibliogràfica i els treballs realitzats, s'apunten les següents línies d'investigació i d'aplicació en aquest àmbit:

- La propera posada en marxa d'un sistema de recollida de dades sistemàtic posterior als incendis, des del Cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya, representa una oportunitat per poder elaborar estadístiques representatives en el futur i d'accés públic. En particular, en el camp dels incendis d'origen elèctric, també pot ser una font d'informació que permeti realitzar recerca estadística. També és una oportunitat per intentar realitzar millores dels procediments que s'han importat de EUA. L'associació amb experts pot ajudar a millorar la fiabilitat de les estadístiques.
- El desenvolupament d'una tècnica d'anàlisi metal·lúrgica que diferenciés els rastres de fusió associats als arcs elèctrics anteriors i posteriors a l'incendi, que pugui ser estadísticament validada, ajudaria a distingir-los. La recerca experimental en la verificació de les tècniques de cartografia d'arcs, també podria ajudar a facilitar la tasca dels investigadors de sinistres i millorar el grau de determinació i fiabilitat de les estadístiques.
- Investigar la possible relació entre l'increment dels desequilibris de corrents, que augmenten la circulació de corrent pel neutre; i la ignició elèctrica en les instal·lacions elèctriques d'edificis i indústries.
- La casuística de descàrregues elèctriques i arcs en sistemes de 400V, en relació amb la ignició elèctrica, és més severa i pot comportar factors diferents que la de 230V. La recerca en l'àmbit de la influència del nivell de tensió i l'efecte de la variable temps en línies de BT i sistemes de potència trifàsics industrials, en relació amb l'incendi, pot desembocar en aportacions útils.
- Estudiar experimentalment la incidència de les descàrregues per pistes conductores en el cablejat i contactes d'instal·lacions i equips elèctrics comuns dels edificis, en relació amb els incendis d'origen elèctric que s'hi produeixen. En particular la variable temps és indeterminada. No està clar quant temps requereixen aquests processos per produir la ignició en una determinada instal·lació convencional de BT.
- Els arcs són més difícils de detectar que les sobreintensitats. La protecció contra els arcs és més complexa. En particular, l'arc sèrie i les descàrregues per pistes conductores són fenòmens molt difícils de detectar. Desenvolupar dispositius de protecció contra aquests fenòmens ajudaria a combatre l'incendi d'origen elèctric. La distorsió harmònica del corrent que introdueix l'arc pot ser un camí a seguir. Existeix un estudi recent, que proposa un algoritme i un dispositiu econòmic per detectar l'arc sèrie, a partir de l'anàlisi del cinquè harmònic [123]. La resolució del problema no és trivial ni fàcilment generalitzable. La

presència de dispositius que introdueixen distorsions harmòniques (sovint també del cinquè harmònic) és actualment habitual en els edificis i les indústries.

- Investigar experimentalment la possibilitat d'ignició elèctrica deguda a la inducció electromagnètica, en el cablejat d'instal·lacions i quadres elèctrics d'edificis i indústries.
- Existeixen estudis recents sobre la formació de fulgurites a prop dels pilons d'acer de les línies aèries d'alta tensió, degudes a descàrregues produïdes per l'impacte de llamps. La literatura i estudis sobre les fulgurites formades per descàrregues des de conductors de línies aèries d'alta tensió caiguts a terra, és escassa. Al Laboratori de Màquines Elèctriques de l'ETSEIB, existeix una mostra d'aquest cas, conservada pel Dr. Ricard Bosch, que encara no ha estat objecte d'un anàlisi a fons. Podria ser el punt de partida d'un treball de recerca en aquest àmbit. D'altra banda, l'arc transforma i adhereix la sorra transportada pel vent sobre els conductors de les línies aèries. Aquests rastres també poden ser objecte d'estudis futurs.
- La corona normalment té associada una capacitat de transmissió d'energia molt baixa, que només pot produir combustió en ambients altament inflamables. La possibilitat d'aplicar la ignició elèctrica per corona en els sistemes d'encesa dels motors de combustió interna per fer-los més eficients, és objecte d'un projecte de recerca del Departament de Màquines i Motors Tèrmics de la UPC, dirigit pel Dr. Jesús Álvarez; i amb suport d'empreses del sector. Un estudi preliminar en forma de Projecte de Fi de Carrera d'Enginyeria Industrial es troba disponible [124].
- La microscòpia virtual és una tècnica que recentment s'ha aplicat a la medicina i a la seva docència. Permet que experts puguin analitzar mostres a distància. També que es puguin compartir bases de dades de mostres, prèviament digitalitzades, a través de la xarxa amb aplicació docent. Cada alumne pot analitzar-les amb un microscopi virtual instal·lat al seu ordinador. El projecte "Virtual Microscope" de la Universitat de Nova York, n'és un exemple [125]. Aquesta tecnologia podria ser aplicada a l'anàlisi de mostres forenses procedents de sinistres i a la seva docència.
- Difondre l'estat de l'art de l'incendi d'origen elèctric entre enginyers i instal·ladors, pot ajudar a mitigar la seva incidència. A Catalunya, els currículums universitaris d'enginyeria presenten poca atenció a aquest tema. Els instal·ladors són responsables directes d'executar i mantenir les instal·lacions elèctriques, pel que les seves actituds i actuacions diàries tenen conseqüències directes en relació amb el risc d'ignició elèctrica. Les escoles de formació professional i els gremis d'instal·ladors poden jugar un paper en aquesta tasca. Els currículums docents de formació professional actuals també presten poca atenció a aquesta temàtica. Un projecte d'innovació educativa per incloure'ls podria ser útil. Alguns dels experiments proposats són suficientment senzills i econòmics, com per dur-los a terme a la majoria de laboratoris i tallers docents.

4.3.2 Ejecció d'espurnes i partícules calentes d'origen elèctric

- La recerca en l'àmbit de l'ejecció de partícules calentes d'origen elèctric, ha rebut poca atenció. Tot i que no és estadísticament una de les principals causes d'incendi d'origen elèctric, té una incidència no menyspreable. Les pluges d'espurnes també poden contribuir a propagar un incendi, quan són produïdes pels arcs secundaris que es produeixen quan les flames destrueixen els aïllaments dels conductors. Realitzar aportacions en aquest àmbit de recerca, pot ajudar a millorar la seguretat de les instal·lacions elèctriques.
- Relacionar les característiques de les espurnes d'alumini ejectades durant la circulació de corrents forts amb arc de separació, amb els tipus i característiques dels materials que poden tenir l'habilitat d'inflamar.
- S'ha observat que el punt de l'ona sinusoidal en que es produeix el curtcircuit influeix en l'ejecció d'espurnes. També influeix el nivell de tensió eficaç del sistema de BT. La incorporació d'un control del punt en que s'inicia el curtcircuit, en l'automatisme que controla els contactors que governen l'assaig, ajudaria a sistematitzar els experiments. És factible realitzar-lo, per exemple a partir d'un detector electrònic de passos per zero. Ajudaria a establir la relació entre cada punt de la senoide i nivell de tensió instantània; i la virulència de l'assaig i la quantitat d'espurnes ejectades. Permetria establir uns nivells de tensió mínims perquè es produís l'ejecció. També a relacionar els diferents nivells de tensió eficaç, amb la probabilitat que es produeixi un determinat grau d'ejecció d'espurnes abans de l'actuació de les proteccions.
- Les reaccions aluminotèrmiques, com la termita, poden donar lloc a flames amb temperatures molt elevades, automantingudes i difícils d'extingir. Per iniciar aquesta reacció es requereix una energia inicial molt elevada, que pot aportar un arc elèctric. També la presència de metalls com el ferro (poden ser presents en entorns industrials i en les instal·lacions). Es podria estudiar la possibilitat que al produir-se un defecte amb arc, en presència de conductors o masses d'alumini i aquests metalls, es pogués desencadenar aquesta reacció. Podria provocar un incendi o contribuir significativament com a factor accelerant o propagador.
- Estudiar l'efecte limitador que els diferents tipus de proteccions elèctriques poden introduir en l'ejecció d'espurnes d'origen elèctric.
- L'anàlisi de defectes elèctrics com l'ejecció d'espurnes i partícules calentes, utilitzant de forma combinada filmacions i fotografies realitzades a alta velocitat i oscil·logrames elèctrics, ajuda a estudiar els efectes que es produeixen. També permet il·lustrar-los amb una finalitat d'aplicació docent. La disminució del preu de les càmeres d'alta velocitat i resolució, pot ajudar en aquest sentit.

- L'aplicació docent dels experiments realitzats, és factible en molts laboratoris i tallers universitaris i de formació professional, amb un cost baix. En particular a la formació professional, els curtcircuits són habituals pels errors que els alumnes realitzen quan inicien el seu aprenentatge. La reproducció experimental d'un curtcircuit controlat amb ejecció d'espurnes, ajuda a transmetre aquest concepte perquè sigui tingut en consideració durant la futura carrera professional del tècnic. En general, una experiència pràctica acostuma a incrementar el grau d'aprenentatge respecte altres metodologies. A llarg termini, pot augmentar la seguretat de les instal·lacions.
- L'efecte estètic de les espurnes d'alumini és utilitzat habitualment en aplicacions pirotècniques. Actualment des del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la UPC s'estan desenvolupant projectes de recerca de propulsió elèctrica de vaixells. La pirotècnia elèctrica de l'alumini, convenientment controlada, podria tenir una aplicació lúdica en aquest àmbit.

4.3.3 Descàrregues elèctriques en presència de foc

- Els Bombers de la Generalitat de Catalunya han observat descàrregues produïdes durant els incendis en línies aèries de AT. Han manifestat la seva preocupació per aquesta casuística. No obstant no ha estat registrada ni analitzada estadísticament amb un estudi d'accés públic. Aquesta tasca ajudaria a estudiar i mesurar l'impacte d'aquesta problemàtica en el nostre entorn i altres ànlegs. Per exemple, constatar que es produeix amb major freqüència a prop del suport, podria orientar mesures preventives.
- La magnitud de la disminució de la tensió disruptiva associada a línies aèries afectades per un incendi, és variable en funció dels combustibles presents. Les cendres d'origen vegetal tenen un important efecte reductor de la tensió disruptiva. Els efectes de la vegetació autòctona Mediterrània en aquest àmbit, durant els incendis forestals, no ha estat estudiada. Caldria una caracterització de les partícules conductores i la seva concentració a les flames dels incendis forestals. També una metodologia per reproduir-les al laboratori electrotècnic de AT. El Centre d'Estudis del Risc Tecnològic (CERTEC), associat a la UPC, té una línia de recerca activa sobre l'estudi d'incendis forestals amb la que pot haver un entorn de col·laboració. L'efecte de les partícules conductores generades en les flames en l'àmbit d'incendis industrials i en instal·lacions elèctriques de AT, tampoc ha estat estudiada.
- S'han observat efectes d'interacció entre les descàrregues i les flames, però no de la violència dels que es produeixen en incendis reals. Els estudis que s'han portat a terme sobre el tema, utilitzen generalment transformadors d'assaig amb corrents d'arc molt limitats. Per una anàlisi més realista del fenomen, un cop s'ha produït la ruptura, caldrien majors potències de curtcircuit. A la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB s'ha posat en servei un transformador de distribució de 630kVA i 25kV, alimentat des dels seus debanats de BT. Es podria utilitzar amb aquesta finalitat. S'ha realitzat algun contacte preliminar per una col·laboració amb la companyia elèctrica en aquest àmbit.

- S'ha observat que els oscil·logrames de tensió i corrent ajuden a interpretar i explicar el fenomen. Per exemple, la polaritat té una influència significativa en aquesta casuística. Les formes d'ona de les descàrregues parcials i l'arc en presència de foc són singulars. És un àmbit en el que s'ha realitzat poca recerca i existeix poca divulgació de la mateixa. Aprofundir en el seu estudi podria aportar llum a la comprensió d'aquests fenòmens. Les característiques de tensió i corrent i els comportaments observats amb corrents forts, poden ser diferents que els observats amb corrents reduïts.
- La determinació de l'esquema equivalent del circuit que es forma entre dos elèctrodes units per una flama o una flama i aire, podria ser útil per realitzar simulacions per computador. L'estudi de la distribució del camp elèctric pot ser estudiada amb elements finits. Es poden tenir en compte els "punts triples" singulars en les fronteres aire o flama-elèctrode-partícula conductora.
- L'efecte propagador de l'incendi que puguin comportar aquestes descàrregues en línies aèries; i els fenòmens de combustió sobtada associats que s'han observat en incendis reals, no han estat estudiats. Poden dependre de múltiples factors. Aquesta tasca pot tenir aplicació en l'estudi de l'efecte propagador de l'incendi produït per l'arc, en altres tipus d'instal·lacions elèctriques.
- En l'àmbit de la docència, està estesa la divulgació de l'efecte de la disminució de la rigidesa dielèctrica de l'aire ocasionada per la variació de la densitat amb l'augment de la temperatura. No obstant, aquest concepte no explica completament la complexitat de les descàrregues produïdes durant els incendis, que són menys conegudes. Els experiments presentats són d'execució relativament senzilla i il·lustratius. Poden contribuir a divulgar aquesta problemàtica. En aquest sentit van ser presentats a la "*Student Poster Research Session, NFPA (National Fire Protection Association) Conference & Expo 2014*". D'altra banda, alguns efectes es poden observar qualitativament utilitzant generadors electrostàtics més accessibles i populars en molts laboratoris electrotècnics i de física bàsics, per arribar a un públic més ampli.
- El control mitjançant camps elèctrics de la forma, oscil·lació i extinció de les flames, pot tenir aplicacions tecnològiques per explorar. Per exemple, en l'àmbit de l'espectacle.

Bibliografia

- [1] HALL, J.R. Jr. *Home electrical fires*. National Fire Protection Association (NFPA), 2013, p.4. Disponible a: <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics>
- [2] BABRAUSKAS, V. *Research of the electrical fires: the state of the art*. Fire Safety Science—proceedings of the Ninth IAFFS International Symposium, 2008, p.3. Disponible a: <http://www.iafss.org/publications>
- [3] SANS, J.; BOIXADÉ, J.; BOSCH, R.; et al. *La investigació d'incendis i explosions*. Col·lecció segments de seguretat 1. Institut de Seguretat Pública de Catalunya. Mollet del Vallès, Octubre de 2010, p.23. Disponible a: <http://www.recercat.cat/>
- [4] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). *NFPA 921: Guide for Fire and Explosions Investigations*. 2014 edition, NFPA, 2014, p.15. Disponible a: <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/>
- [5] Ibid., p.14.
- [6] Ibid., p.217.
- [7] SANS. Op. cit. 3, p.110.
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE SALUD E HIGIENE EN EL TRABAJO (INSHT). *NTP 225: Electricidad estática en trasvase de líquidos inflamables*. INSHT, 1988, p.1. Disponible a: <http://www.insht.es/>
- [9] INSTITUTO NACIONAL DE SALUD E HIGIENE EN EL TRABAJO (INSHT). *NTP 827: Electricidad estática en polvos combustibles (I): características de las descargas electrostáticas*. INSHT, 2009, p.4. Disponible a: <http://www.insht.es/>
- [10] BOIX, O.; CORCOLES, F.; SAINZ.; SUELVES, F.J. *Tecnología eléctrica*. Ediciones Ceysa, Barcelona, 2002, p.16.
- [11] CARMONA, D. *Manual de instalaciones eléctricas*. Abecedario, Badajoz, 2004, p.528.
- [12] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA. *Guía técnica de aplicación del REBT BT-25: Instalaciones interiores en viviendas. Números de circuitos y características*. Julio de 2012, p.15. Disponible a: http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/rebt_guia.aspx
- [13] YEREANCE, R. *Electrical fire analysis*. Charles C Thomas Publisher. Springfield, 1995, p.197.

[14] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA. *Reglamento electrotécnico para baja tensión e instrucciones técnicas complementarias (ITC) BT 01 a BT 51*. Suplemento del BOE núm. 224, de miércoles 18 de setiembre de 2002, p.9.

Disponible a: http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/rebt_guia.aspx

[15] DIARI OFICIAL DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA (DOGC). *Resolución ECF/4548/2006, de 29 de diciembre de 2006, por la que se aprueba a FECSA-ENDESA las normas técnicas particulares relativas a las instalaciones de red y a las instalaciones de enlace*. DOGC Número 4827, de 22 de febrer de 2007, p.6545. Disponible a: <http://dogc.gencat.cat/ca/>

[16] SANS. *La investigació d'incendis i explosions*. Op. cit. 3, p.106.

[17] BABRAUSKAS. *Research of the electrical fires: the state of the art*. Op. cit. 2, p.11.

[18] NFPA 921. Op. cit. 4, p.107.

[19] BABRAUSKAS, V. *Ignition Handbook*. Fire Science Publishers, Society of Fire Protection Engineers, Issaquah, 2003, p.549.

[20] BABRAUSKAS, *Research of the electrical fires: the state of the art*. Op. cit. 2, p.6.

[21] NEIKOV, O. *Handbook of Non ferrous metal powders: technologies and applications*. Elsevier Science, 2009, p.341.

[22] NFPA 921. Op. cit. 4, p.113.

[23] YEREANCE. *Electrical fire analysis*. Op. cit. 13, p.69.

[24] LIDE, D.R, et al. *CRC Handbook of chemistry and physics*. CRC Press. Boca Raton, 85th edition, 2004, p.4-3, 4-9.

[25] YEREANCE. *Electrical fire analysis*. Op. cit. 13, p.107.

[26] NFPA 921. Op. cit. 4, p.112.

[27] CORTES, M. *Curso de apartament elèctrica*. Schneider Electric, Barcelona, 1991, p.48.

[28] KREUGER, F.H. *Industrial high DC voltage*. Delft University Press, The Hage, 1992, p.77.

[29] Ibid., p.83.

[30] LIDE. Op. cit. 24, p.4-33.

[31] SANS. *La investigació d'incendis i explosions*. Op. cit. 3, p.31.

[32] CORBET, G., et al. *Fire engineering's handbook for firefighters*. Pen Well Corporation. Tulsa (Oklahoma), 2009, p.78.

- [33] TIPLER, P.A; MOSCA, G. *Physics for scientists and engineers*. W.H. Freeman, New York, 5th edition, 2003, p.399.
- [34] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.76.
- [35] MINISTERIO DE ECONOMIA. *RD 1995/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica*. BOE» núm. 310, de 27 de diciembre de 2000, p.45988-46040. Disponible a: http://www.boe.es/diario_boe/
- [36] UHM, H.S.; JUNG, S.J; KIM, H.S. *Influence of gas temperature on electrical breakdown in cylindrical electrodes*. Journal of the Korean physical society, Vol. 42, 2003, p.992. Disponible a: <http://www.kps.or.kr/home/eng/>
- [37] CORTES. *Curso de aparamenta eléctrica*. Op. cit. 27, p.51.
- [38] NOTTINGHAM, W.B. *A new equation for the static characteristic of the normal electric arc*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. XLII, 1923, p.302. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>.
- [39] ANDREA, J.; SCHWEITZER, P.; TISSERAND, E. *A new DC and AC electrical arc fault electrical model*. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference, IEEE conference publications, 2010, p1. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>.
- [40] ZELLER, P.; SCHOEPF, T.J. E. *Advanced arc model for computation of low current arc characteristics*. Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference, IEEE conference publications, 2010, p1. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>.
- [41] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.98, 101.
- [42] INTERNATIONAL ELECTROTECNICAL COMMISSION. IEC60060-1: High voltage test techniques. IEC, 2010, p.33.
- [43] SANS. *La investigació d'incendis i explosions*. Op. cit. 3, p.107.
- [44] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.93.
- [45] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). *NFPA 77: Recommended practice on static electricity*. 2014 edition, NFPA, 2014, p.12.
- [46] GRABARCZYK, Z.J. *Laboratory ignition of hydrogen and carbon disulphide in the atmospheric air by positive corona discharge*. Journal of electrostatics, Vol.71 (6), 2013, p.1041-1045. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/>
- [47] KAISER, K.L. *Electrostatic discharge*. CRC Press, Boca Raton, 2006, p.2-73.

- [48] Ibid., p.2-76.
- [49] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.95.
- [50] YEREANCE. *Electrical fire analysis*. Op. cit. 13, p.212.
- [51] NFPA 77. Op. cit. 45, p.14.
- [52] HU, Y.; WANG, D.; JIANSHE GAO, J.L. *A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation*. Journal of physics: conference series 418, 2013, p.4. Disponible a: <http://iopscience.iop.org/>
- [53] NFPA 921. Op. cit. 4, p.108.
- [54] BABRAUSKAS, V. *Mechanisms and Modes for Ignition of Low-Voltage PVC Wires, Cables, and Cords, in Fire & Materials 2005*. Interscience Communications Ltd., 2005, p.300.
- [55] WAGNER, R. *Study of arc track properties of plastic materials when subjected to DC voltage ranges from 12V-150V*. United States Council for automotive research E232052/02ME2108, 2003,p.1.1-10.3.
- [56] STUEBER, T.J; McCALL, D.; HAMMOUD, A. *Comparison of arc tracking tests in various aerospace environments. Conference. Record of the 1996 IEE International symposium on insulation (Montreal), IEEE, 1996, p.349-352 (vol. 1)*. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>.
- [57] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA. *Guía técnica de aplicación del REBT BT-17: Dispositivos generales e individuales de mando y protección. Interruptor de control de potencia*. Julio de 2002, p.2. Disponible a: http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/rebt_guia.aspx
- [58] BABRAUSKAS, V. *Fires due to Electric Arcing: Can ‘Cause’ Beads Be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing?*. Fire and Materials, Interscience Communications Ltd., London, 2003, p.201.
- [59] NFPA 921. Op. cit. 4, p.115.
- [60] MUTHURAMAN, N.; PALANI, P.; RAJAKARUNAKARAN, S. *Arc mapping: an effective tool to determine fire area of origin in fire investigation*. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol.03. Special Issue: 11, 2014, p.62. Disponible a: <http://ijret.org>
- [61] COLLINS, G.S.; MELOSH J.; PASEK, M.A. *Can lightning strikes produce shocked quartz?*. 43rd Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, 2012, p.1. Disponible a: <http://www.lpi.usra.edu>
- [62] PASEK, M.A.; BLOCK, K.; PASEK, V. *Fulgurite Morphology: a classification scheme and clues to formation*. Springer-Verlag, 2012, p.1. Disponible a: <http://link.springer.com/>

- [63] KASSI, A.M; KASI, A.K; FRIIS, H.; KAKAR, D.M. *Occurrences of rock-fulgurites associated with steel pylons of the overhead electric transmission line at Tor Zawar, Ziarat District and Jang Tor Ghar, Muslim Bagh, Pakistan*. Turkish Journal of Earth Sciences, 2013. Vol. 2, p.1010. Disponible a: <http://journals.tubitak.gov.tr/earth/>
- [64] GRAPES, R. *Pyrometamorphism*. Springer-Berlag Berlin, 2011, p.285.
- [65] NIKIC, D.; DAY, A.C. *Arc erosion of aluminum and titanium in presence of high currents*. Pulsed Power Conference (PPC), 2013 19th IEEE, San Francisco, IEEE, 2013, p. 2. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>
- [66] YEREANCE. *Electrical fire analysis*. Op. cit. 13, p.210.
- [67] *Typical Arc Tracking Test result for a Sample of MIL-W-81381 American Wire Gauge (AWG) 20*. NASA Glenn Research Center. Actualitzada 02/04/2014. Consultada 15/06/2014. Disponible a: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/epbranch/SpaceEnvSim/arc2.htm>
- [68] Enciclopèdia Catalana. *Gran Enciclopèdia Catalana*. Enciclopèdia Catalana SA, Barcelona, 1976. Vol.7, p.75 i Vol.8, p.337.
- [69] CONKLING, J.A.; MOCELLA, C. *Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory*. CRC Press, Boca Raton, 2010, p.184.
- [70] NFPA 921. Op. cit. 4, p.109.
- [71] CONKLING. Op. cit. 69, p.185.
- [72] KOSANKE, B.J; KOSANKE, K.L. *Pyrotechnic spark generation*. Journal of pyrotechnics, Selected Pyrotechnic Publications of K.L. and B.J. Kosanke, 2008, p.356. Disponible a: <http://www.jpyro.com/>
- [73] BABRAUSKAS. *Research of the electrical fires: the state of the art*. Op. cit. 2, p.12.
- [74] LIDE. *CRC Handbook of chemistry and physics*. Op. cit. 24, p.4-45.
- [75] LIM, J.; YANG, H.; YOON,W.; LEE,D.H.; *Burning and ignition characteristics of single aluminum and magnesium particle*. American Institute of Astronautics and Aeronautics, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, 2010, p.6.
- [76] KOSANKE. Op. cit. 72, p.355.
- [77] DURAES, L.; COSTA, B.F.O; SANTOS, R.; et al. *Fe₂O₃/aluminum thermite reaction intermediate and final products characterization*. Materials Science & Engineering A. Elsevier, 2007, p.1,2. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/>

- [78] *Power lines in Bellevue Washington spark and cause fire*. Youtube. Youtube LLC, 28 de maig de 2013. Web. Consultada 23 de febrer de 2014. Disponible a: <https://youtu.be/DIedWGCMR5w>
- [79] *¿Qué sucede si a las barras de cobre, se realiza un tratamiento superficial con zinc?*. Preguntas técnicas frecuentes. Schneider Electric. Web. Consultada 10 de març de 2015. Disponible a: <http://www.schneiderelectric.es/sites/spain/es/soporte/faq>
- [80] AHRENS, M. *Home fires involving cooking equipment*. NFPA, novembre de 2013, p.9,10. Disponible a: <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics>
- [81] ARTHUR, K.K; WONG, N.;FONG, N.K. *Experimental study of induction cooker fire hazard*. School of Engineering of Sun Yat-sen University, Elsevier (open access), 2013, p.13-22. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/>
- [82] HARRY, K.J.; BALSARA, N.P. *Lithium Dendrite Growth through Polymer Electrolytes*. Abstract #1097, 224th ECS Meeting, 2013, The Electrochemical Society, 2013, p.1.
- [83] HARRY, K.J.; HALLINAN, D.T.; PARKINSON, D.Y.; et al. *Detection of subsurface structures underneath dendrites formed on cycled lithium metal electrodes*. Nature Materials 13, 69–73, 2014. Disponible a: <http://www.nature.com/nmat/journal/v13/>
- [84] INSTITUT D'ESTADÍSTICA DE CATALUNYA (IDESCAT). *Anuari estadístic de Catalunya. Incendis forestals 2010-2014 per causes*. IDESCAT. Web. Consultada el 10 de febrer de 2015. Disponible a: <http://www.idescat.cat/>
- [85] PLATAFORMA PARA LA REVISION DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS (PRIE). *Documento técnico PRIE octubre de 2006*. PRIE, 2006, p.20.
- [86] Ibid., p.7.
- [87] BRUSHLINSKY, M.; AHRENS, M.; SOKOLOV, S.V.; WAGNER, P. *World Fire Statistics*. CTIF Report nº20. International Association of Fire and Rescue Service, 2015, p.1-63. Disponible a: <http://www.ctif.org>
- [88] AHRENS, M. *Lightning Fires and Lightning Strikes*. National Fire Protection Association (NFPA), 2013, p.4. Disponible a: <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics>
- [89] HALL. *Home Electrical Fires*. Op. cit. 1, p.3,4.
- [90] AHRENS. Op. cit. 88, p.6.
- [91] AHRENS, M. *U.S. Vehicle Fire Trends and Patterns*. National Fire Protection Association (NFPA), 2010. Disponible a: <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics>

- [92] MARTÍ, M.; BOSCH, R. *Instal·lació i posada en servei d'una plataforma d'assaig de potència de 400kVA al laboratori d'alta tensió de l'ETSEIB-UPC*. Master Thesis (pre-Bologna period). Treballs acadèmics UPC, UPC Commons, 2006, p.11-92.
Disponible a: <http://upcommons.upc.edu/>
- [93] YEREANCE. *Electrical fire analysis*. Op. cit. 13, p.111.
- [94] LIDE. *CRC Handbook of chemistry and physics*. Op. cit. 24 , p.12-1.
- [95] LIN,M.; GONG, M.; LU,B.; et al. *An ultrafast rechargeable aluminium-ion battery*. Nature 520, 324–328, abril de 2015, p.1. Disponible a: <http://www.nature.com/>
- [96] HALL, J.R. Jr. *Home Fires involving air conditioning or related equipments*. National Fire Protection Association (NFPA), 2012.
Disponible a: <http://www.nfpa.org/research/reports-and-statistics>
- [97] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO; MINISTERIO DE VIVIENDA. *Versión consolidada del Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, (BOE 9-09-2013) por el que se aprueba el Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios*. Secretaria de Estado de Energía, Madrid, setiembre de 2013, p.1-27. Disponible a: <http://www.minetur.gob.es/energia/>
- [98] MINISTERIO DE VIVIENDA. *Código técnico de la edificación y documentos CTE*. Ministerio de Fomento, Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo. Madrid, 2006-2013.
Disponible a: <http://www.codigotecnico.org/web/>
- [99] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA. *Guía técnica de aplicación del REBT BT-20: Instalaciones interiores o receptoras. Sistemas de instalación*. Julio de 2012, p.5-6. Disponible a: http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/rebt_gui.aspx
- [100] KOSANKE. *Pyrotechnic spark generation*. Op. cit. 72, p.362.
- [101] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.85.
- [102] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. *Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre, por el que se aprueba la clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y de resistencia frente al fuego*. Secretaria de Estado de Energía, Madrid, octubre de 2013, p.93496. Disponible a: <http://www.minetur.gob.es/energia/>
- [103] BOSCH, R. *Informe n°416 i n°425 del Laboratori d'Assaig de Màquines Elèctriques i alta tensió de l'ETSEIB-UPC*. ETSEIB-UPC, Barcelona, 22 de juliol i 30 de desembre de 2003, p.1.
- [104] FONSECA, J.R.; TAN, R.L.; SILVA, R.P.; et. al. *Effects of Agricultural Fires on the Performance of Overhead Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, N°2, abril de 1990, p.687-694. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>

- [105] ROBLEDO-MARTINEZ, A.; GUZMAN, E.; HERNANDEZ, J.L. *Dielectric Characteristics of a Model Transmission Line in the Presence of Fire*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, N°4, agost de 1991, p.776-782. Disponible a: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl>
- [106] PU, Z.; RUAN, J.; HUANG, D.; et. al. *Study on the breakdown characteristics of the transmission line gap under forest fire conditions*. John Wiley & Sons, Ltd, setembre de 2014, p.1-13.
- [107] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.84.
- [108] Ibid., p.83.
- [109] USHAKOV, V.Y. *Insulation of high-voltage equipment*. Power Systems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004, p.43.
- [110] *Station Fire Power Line Arc*. Youtube. Youtube LLC, 28 d'agost de 2009. Web. Consultada 10 de desembre de 2013. Disponible a: <https://youtu.be/VxS0fLikwhs>
- [111] MATTHÄI, M.; PETEREIT, N. *The Quality Candle*. European Candle Association, 2004, p.17-18. Disponible a: <http://www.eca-candles.com/>
- [112] CANDLE SCIENCE & TESTING. *Report on the Ökometric Wax and Emissions Study*. European Candle Association, 2007, p.1. Disponible a: <http://www.eca-candles.com/>
- [113] PORTER, M. *Gas Burners for Forges, Furnaces and Kilns*. Skipjack Press Inc., 2004, p.10.
- [114] SHARMA, S.; SHEORAN, G.; SHAKHER, C. *Investigation of temperature and temperature profile in axi-symmetric flame of butane torch burner using digital holographic interferometry*. Optics and Lasers in Engineering 50, 2012, p.1439-1443. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/>
- [115] CHRISTEN, H.R. *Fundamentos de química orgánica*. Alhambra, Madrid, 1983, p.782.
- [116] KREUGER. *Industrial high DC voltage*. Op. cit. 28, p.78.
- [117] Ibid., p.80.
- [118] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. *Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09*. B.O.E. N° 068 publicado el 19/3/2008, p.16522. Disponible a: <http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/>
- [119] Ibid., p.16515.

- [120] DIARI OFICIAL DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA (DOGC). *Decret 268/1996, de 23-07-1996, pel qual s'estableixen mesures de tallada periòdica i selectiva de vegetació en la zona de influència de les línies aèries de conducció elèctrica per a la prevenció de incendis forestals i seguretat de les instal·lacions*. DOGC Número 2236, de 29 de juliol de 1996, p.7734-7737. Disponible a: <http://dogc.gencat.cat/ca/>
- [121] GAO, N.; LI, A.; QUAN, C.; et.al. *TG-FTIR and Py-GC/MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 100, 2013, p.26-32. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/>
- [122] VASSILEV, S.V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L.K; VASSILEVA, C. *An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification*. Fuel 105, 2013, p.19-39. Disponible a: <http://www.sciencedirect.com/>
- [123] HADZIEFENDIC, N.; KOSTIC, M.; RADAKOVIC, Z. *Detection of series arcing in low-voltage electrical installations*. European Transactions on Electrical Power, 2009, vol.19, p.423. Disponible a: <http://www.researchgate.net/>
- [124] BAGARIA, G.; ALVAREZ, J. *Designing and testing of a corona discharge ignition device*. Master Thesis (pre-Bologna period). Treballs acadèmics UPC, UPC Commons, 2014, p.1-78. Disponible a: <http://upcommons.upc.edu/>
- [125] *NYU School of Medicine Virtual Microscope*. NYU School of Medicine. Web. Consultada 10 d'abril de 2015. Disponible a: <http://education.med.nyu.edu/virtualmicroscope/>
- [126] HADZIEFENDIC. Op. cit.123, p.426.
- [127] FUNDACION MAPFRE. *Siniestros de incendio causados por instalaciones eléctricas en viviendas*. Jornada sobre Diseño y Ubicación de Mecanismos Eléctricos : Optimización y Seguridad. - Madrid : FUNDACION MAPFRE, Instituto de Prevención, Salud y Medio Ambiente: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid, 2010, p.40. Disponible a: <http://www.mapfre.com/documentacion/>
- [128] BLANK, E.W. *Micromelting Point Determination with the Thiele Tube*. Industrial Engineering Chemistry Analytical Edition, 5 (1), 1933, p.74,75. Disponible a: <http://pubs.acs.org/>
- [129] BOSCH, R. *Informe nº396 del Laboratori d'Assaig de Màquines Elèctriques i alta tensió de l'ETSEIB-UPC, per a Crawford & Company*. ETSEIB-UPC, Barcelona, 1 de març 2003, p.1.
- [130] BUNTE, C.; ZAMBONI, L.; GLASSEL, M.; ZALCMAN,D. *Desarrollo de aleaciones de aluminio para aplicaciones en la industria eléctrica*. SAM-CONAMET 2007, Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales, Buenos Aires, 2007, p.1. Disponible a: <http://www.materiales-sam.org.ar>

Annex A. Taules i figures complementàries

A.1 Taules complementàries

A.1.1 Taules relatives al capítol 1

Propietats dels combustibles en funció de l'origen i propagació del foc		
Àmbit	Propietat	Definició
Origen del foc	Límits d'inflamabilitat	Límits inferior i superior de la concentració del combustible en la mescla amb l'oxidant, que estableixen el rang on és possible la combustió.
	Temperatura d'inflamació	Sempre i quan hi hagi una font d'ignició, serà la temperatura mínima necessària perquè es generi el foc (el combustible produirà vapors en concentració suficient perquè, un cop barrejats amb l'aire, la mescla es trobi dins dels límits d'inflamabilitat). Si la font d'ignició desapareix, a aquesta temperatura la mescla cremarà efímerament donat que no es generen vapors suficients per mantenir.
	Temperatura d'ignició	A partir d'aquesta temperatura el combustible emet vapors, amb una velocitat suficient com per propiciar una combustió continuada.
	Temperatura d'autoignició	És una temperatura superior a la d'ignició, que representa la temperatura mínima que propicia un incendi espontani en presència de comburent, però sense una font d'ignició.
Propagació del foc	Velocitat de propagació de la flama	Indica la capacitat de propagació d'un foc i la velocitat de propagació de la flama sobre la superfície del combustible.
	Velocitat de combustió	Quantitat de combustible consumida, per unitat de superfície i de temps.
	Poder calorífic	Quantitat de calor emesa pel combustible al produir-se la reacció d'oxidació.
	Conductivitat tèrmica	Capacitat del material combustible per transmetre i irradiar la calor. Aquesta característica pot relacionar-se també amb l'origen del foc, donat que pot afavorir que s'arribi al punt d'inflamació/ignició.
	Densitat relativa	Indica si un gas o vapor és més lleuger que l'aire. Quan augmenta la temperatura disminueix. Permet predir la ubicació i desplaçament dels gasos inflamables.
	Resistència mecànica i coeficient de dilatació	Els materials tendeixen a perdre resistència mecànica i a dilatar-se amb l'augment de la temperatura. Aquests fenòmens poden afectar les estructures, si el combustible és element resistent.

Taula A.1 Propietats dels combustibles en funció de l'origen i propagació del foc.

Valors mínims de corrent en funció del material dels elèctrodes per establir un arc sèrie amb una càrrega resistiva		
Material elèctrode 1	Material elèctrode 2	Corrent mínim aproximat per establir l'arc
Coure	Coure	10A
Llautó	Llautó	7A
Coure	Llautó	6,5A
Alumini Aliat	Llautó	2A

Taula A.2 Valors mínims de corrent per establir un arc sèrie. (font: v. [126]).

A.1.2 Taules relatives al capítol 2

Anàlisi EDX	Masses atòmiques en tant per cent (%) (zona groga-vermellosa)				
	Al	O	C	Cu	Si
Espectre 1	55,89	11,44	22,95	9,37	0,35
Espectre 2	54,47	12,38	21,64	11,26	0,25
Anàlisi EDX	Masses atòmiques en tant per cent (%) (zona negra)				
	Al	O	C	Cu	Si
Espectre 1	66,56	7,49	23,96	1,59	0,40
Espectre 2	71,76	5,45	20,89	1,30	0,60

Taula A.3 Anàlisi EDX de la superfície d'un conducte tubular de Al posterior als assajos.

A.1.3 Taules relatives al capítol 3

Tensions disruptives⁵¹ (cresta) associades a l'experiment de l'explosor de banyes procedent d'una espelma de parafina (kV)				
Separació elèctrodes (a)	Sense flama (U_{d0})	Amb flama (U_{df})		
		Distància base flama-elèctrodes (h)		
		5mm	15mm	25mm
10mm	31	7,1	14	21
20mm	38	10	18	25
30mm	45	17	22	27
40mm	53	22	25	31

Taula A.4 Tensions disruptives associades a l'experiment de l'explosor de banyes.

Valor percentual al que es redueixen les tensions disruptives (cresta) sense flama (U_{d0}) per l'acció d'una flama d'espelma de parafina en l'experiment de l'explosor de banyes [$100 \cdot U_{df} / U_{d0}$]			
Separació elèctrodes (a)	Distància base flama-elèctrodes (h)		
	5mm	15mm	25mm
10mm	22,9%	45,2%	67,7%
20mm	26,3%	47,3%	65,7%
30mm	37,7%	48,8%	60,0%
40mm	41,5%	47,2%	58,4%

Taula A.5 Relacions de reducció de U_d a l'experiment de l'explosor de banyes.

⁵¹ El valor de tensió disruptiva és la mitjana aritmètica dels tres valors registrats al realitzar tres repeticions de cada cas.

Tensions disruptives⁵² (cresta) associades a l'experiment de l'explosor de Thiele amb elèctrodes de coure (kV)			
Separació elèctrodes (a)	Sense flama (U_{d0})	Amb flama (U_{df})	
		Groga-taronja	Blava
20mm	41	5,1	3,1
50mm	89	13,8	8,3
100mm	168	21,5	13,3

Taula A.6 Tensions disruptives associades a l'experiment de l'explosor de Thiele.

⁵² El valor de tensió disruptiva és la mitjana aritmètica dels tres valors registrats al realitzar tres repeticions de cada cas.

A.2 Figures complementàries

A.2.1 Sinistre en la instal·lació d'enllaç d'un edifici



Fig.A.1 Escena d'un sinistre probablement produït per un portafusibles mal roscat. (A.f.d, font: v. [127]).

La Fig.A.1 mostra l'escena d'un incendi en el que, segons els seus investigadors, la causa va ser un contacte d'elevada resistència en el portafusibles que protegia un comptador i la derivació individual associada [127].

Es tracta de l'embarrat trifàsic que enllaça la línia general d'alimentació amb els comptadors, en una centralització de comptadors d'un edifici destinat a habitatges. L'embarrat de fase superior s'observa que està deformat, té rastres de fusió i una forta oxidació superficial. Just a sobre hi ha una zona lliure de sutge, que senyala l'origen de l'incendi.

La hipòtesis dels investigadors és que la rosca mal ajustada, va ocasionar una mala fixació del fusible a l'interior del portafusibles. Això va donar lloc a un contacte d'elevada resistència que va produir un sobreescalfament. Aquest sobreescalfament es va transmetre als conductors de la derivació individual cablejats per darrera. Els seus aïllaments es van deteriorar i va tenir lloc un curtcircuit amb arc elèctric.

Una anàlisi de la resistència d'aquesta connexió, en relació amb les annexes, podria haver posat de manifest una major oxidació ocasionada pel mal contacte i ajudar a corroborar que la causa va ser aquesta.

A.2.2 Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB

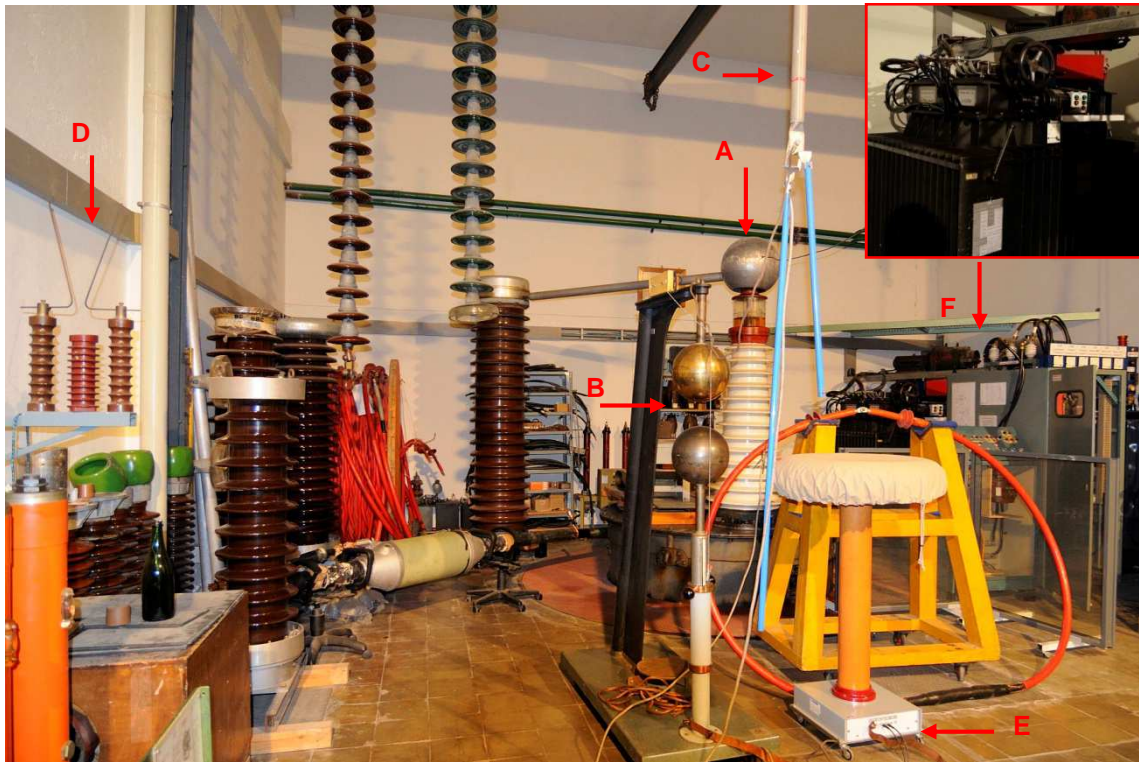


Fig.A.2 Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB. (A.f. Martí, M.).

A la Fig.A.2 es mostren alguns dels equipaments d'assaig de la Sala d'Alta Tensió de l'ETSEIB:

A: Transformador d'assaig monofàsic de AT: $S_N=75\text{kVA}$, $U_N=440\text{V}/300\text{kV}$, $I_N=170,5\text{A}/0,25\text{A}$, $f=50\text{Hz}$ i $u_{cc}=4,8\%$. Alimentat amb un autotransformador regulable. Permet variar la tensió al secundari entre 0-300kV.

B: Explosor d'esferes connectat al transformador A. Permet calibrar la tensió d'assaig.

C: Resistència limitadora de $300\text{k}\Omega$ connectada al secundari del transformador A. Limita el corrent de les descàrregues per millorar l'observació a ull nu de l'arc. Eventualment pot ser curtcircuitada per augmentar el corrent.

D: Experiment de l'explosor de banyes.

E: Equip de generació de descàrregues parcials.

F: Plataforma d'assaig de curtcircuit. Els elements principals són un regulador d'inducció amb $S=400\text{kVA}$, $U_N=0-440\text{V}$, $f=50\text{Hz}$ i un transformador de distribució amb $S_N=630\text{kVA}$, $U_N=25\text{kV}/400\text{V}/230\text{V}$, $f=50\text{Hz}$.

Annex B. Experiments i simulacions complementàries

B.1 Experiments de curtcircuit a tensió reduïda

B.1.1 Experiment amb conductors de coure

Al Laboratori de Màquines Elèctriques de l'ETSEIB existeix un equip d'assaig amb corrents forts, construït amb material procedent d'una donació de l'empresa automobilística SEAT (1985). S'utilitzava per realitzar soldadura per punts. El component principal són tres transformadors monofàsics de 80kVA, 400/15V, que poden ser alimentats amb una tensió d'entrada variable. Existeix la possibilitat de realitzar diverses combinacions de connexions entre ells. L'equip permet mantenir de forma permanent corrents de curtcircuit de més de 15kA. S'utilitza per realitzar assajos d'escalfament, resistència tèrmica en un segon, resistència als esforços electrodinàmics del curtcircuit, compatibilitat electromagnètica en presència de corrents forts, etc. També s'utilitza amb finalitats docents i de recerca.

A la Fig. B.1 es mostra una seqüència fotogràfica⁵³ relativa a un experiment de curtcircuit realitzat sobre un conductor de fils de coure nu, de 25cm de longitud i una secció de 20mm². Permet observar el comportament d'un conductor nu sotmès a corrents de curtcircuit fins al seu trencament per fusió. S'aplica una tensió alterna sinusoidal al conductor, de $U_{ef}=9V$ i $f=50HZ$. El conductor queda sotmès a un corrent de curtcircuit permanent de $I_k=6,7kA$.

L'experiment comença amb una primera etapa, en la que el corrent de curtcircuit té una duració controlada d'un segon. Permet reproduir un curtcircuit permanent de curta duració (normalment un interruptor automàtic convencional de corba C, interrompria el corrent en menys de 5ms amb un corrent de curtcircuit d'aquesta magnitud). El primer que es percep és un efecte electrodinàmic fort que fa vibrar el conductor. També es genera un camp magnètic intens. Aquest efecte electrodinàmic pot ser observat acostant algun objecte metàl·lic lleuger al conductor, com per exemple un joc de claus, perquè és atret pel camp magnètic. Un segon és suficient per veure l'emissió d'una mica de fum des del conductor. El sobreescalfament del conductor produeix la degradació tèrmica de la pols acumulada a la seva superfície. Si el conductor estigués aïllat, aquesta degradació la patirien els aïllaments. El conductor no emet radiació visible.

En una segona etapa s'aplica el corrent de curtcircuit permanent fins que deixa de circular, a causa del trencament del conductor. Després dels efectes electrodinàmics, apareix incandescència. Primer emet llum vermella tènue, que va evolucionant cap a un vermell cada cop més brillant. Posteriorment el color varia a groc llimona i finalment a groc clar. Durant la incandescència s'observa deformació del conductor per fluència, però el cable no vibra per efectes electrodinàmics. Al final d'aquesta fase en alguns assajos (en funció de la longitud, forma i secció del conductor) es produeix degoteig de coure fos. Arriba un moment en el que per un punt es produeix un arc de

⁵³ Les fotografies provenen d'una càmera reflex disparant en mode continu, a excepció del quart fotograma. Aquest instant, va ser capturat mitjançant vídeo (realitzat simultàniament des d'un angle lleugerament diferent), el que explica la diferència de definició.

separació. No té perquè coincidir amb el punt on s'hagi produït degoteig prèviament, si és que s'ha produït. L'arc té una duració molt breu (inferior a 0,2 segons), perquè la tensió és baixa i s'extingeix ràpidament. En aquest instant es produeix una ejecció instantània d'espurnes en totes direccions i a gran velocitat, que s'apaguen ràpidament després d'impactar contra el terra. Deixa de circular corrent (en l'assaig de la Fig.B.1, 2,8 segons després de l'inici). Depenent de la ubicació del punt de trencament, els conductors resultants s'acceleren per acció de la gravetat. Alguns cops es trenquen per un altre punt, a causa del seu moviment, i cau a terra un tram de conductor. Els conductors es refreden i es torna a veure la seqüència de colors descrita anteriorment en sentit contrari. El resultat és un conductor amb els fils soldats entre ells, forta oxidació superficial, osques, forats i puntes arrodonides (amb forma de gota) en el punt de trencament per curtcircuit.

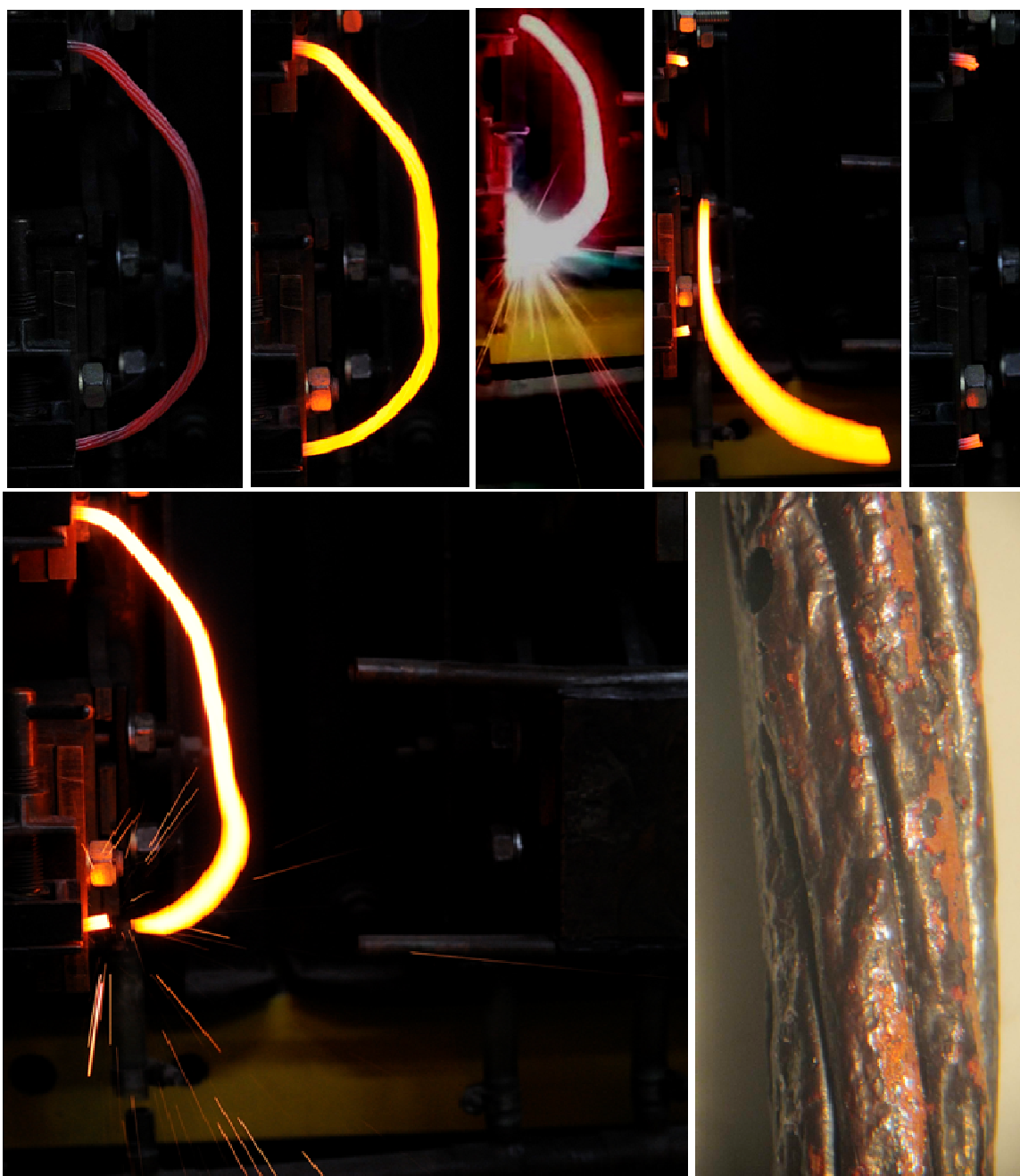


Fig.B.1 Experiment de curtcircuit de 6,7kA sobre un conductor de Cu nu. (A.f Martí, M.).

B.1.2 Experiment d'ejecció d'espurnes des d'un conducte tubular d'alumini

S'ha utilitzat l'equip d'assaig amb corrents forts per realitzar un experiment que il·lustra l'ejecció d'espurnes d'origen elèctric, complementari als que s'han presentat al cap.2. Es connecten dos elèctrodes de coure, per contacte superficial amb un conducte tubular semiflexible d'alumini, utilitzat en sistemes de ventilació, tal i com es mostra a la Fig.B.2. La tensió en buit de l'equip s'ajusta a un valor de 11V.

Al produir-se el curtcircuit s'observen esforços electrodinàmics entre el tub i el conductor, arc elèctric de separació de duració breu; i l'ejecció d'espurnes, des del punt de contacte superior, com s'observa a la Fig.B.2. El nombre d'espurnes ejectades és reduït respecte el que s'ha observat en els experiments mostrats al cap.2. Es relaciona amb la baixa tensió a la que es realitza l'experiment, que fa que l'arc elèctric s'extingeixi molt ràpidament. Es produeix un forat al tub en la zona de contacte des de la que s'ha produït l'ejecció d'espurnes.

La majoria d'espurnes tenen un color blanc brillant, característic de l'alumini en combustió. S'observen també algunes espurnes de color taronja, relacionades amb partícules que han estat ejectades des de l'elèctrode de coure. La trajectòria de les partícules d'alumini es força direccional al principi del seu recorregut i radial. No obstant, també s'observen girs i canvis de trajectòria, de forma anàloga al que s'ha descrit en els experiments del cap.2. La majoria d'elles s'allunyen del tub cap a l'exterior. Tot i així, s'observen algunes espurnes que han estat ejectades cap a l'interior del tub. En el final d'algunes traces, s'observa que la partícula canvia d'un color blanc brillant a un color groguenc o ataronjat. És un color d'incandescència característic de l'alumini quan finalitza la seva combustió, abans que la partícula deixi d'emetre llum.

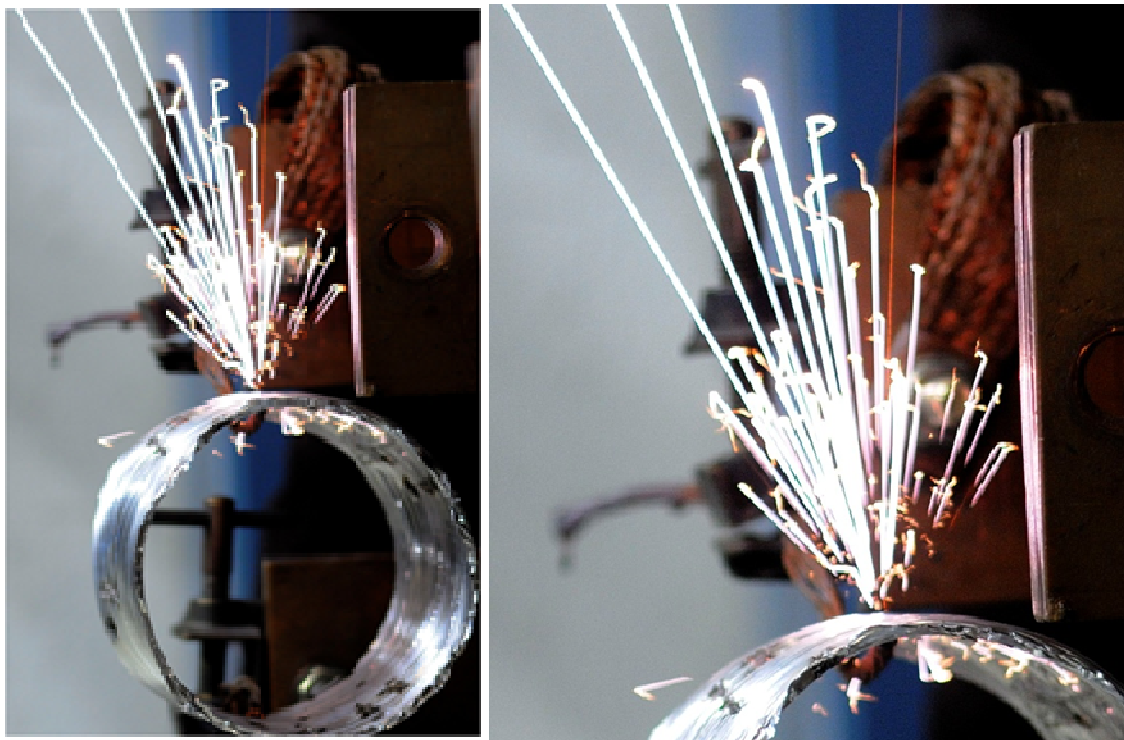


Fig.B.2 Experiment d'ejecció d'espurnes des d'un conducte tubular d'alumini. (A.f Martí, M.).

B.2 Observació dels efectes de la polaritat d'una flama amb generador de Van der Graaf

El cos d'una flama no és elèctricament neutre. La flama és rica en partícules amb càrrega elèctrica. Els ions positius es mouen de l'ordre de 100 vegades més lents que els electrons [116]. Aquest fet promou que els electrons puguin escapar més fàcilment del cos de la flama, que queda carregat amb polarització positiva.

A la Fig.B.3 (a), es mostra un experiment de laboratori qualitatiu per il·lustrar-ho. S'utilitza un generador electrostàtic de Van der Graaf comú (és popular i es pot trobar a molts laboratoris docents de física bàsics). La tensió és a priori desconeguda i la polarització de l'esfera pot ser positiva o negativa. Aquests generadors acostumen a tenir un punt de connexió amb càrrega contrària a la de l'esfera (sovint es connecta a una segona esfera més petita per realitzar descàrregues disruptives entre elles). Es verifica la polaritat amb un comprovador de tensió i polaritat d'alta tensió. En aquest cas l'esfera té polaritat negativa i 10kV en regim nominal. Es col·loquen dues espelmes de cera de parafina enceses a banda i banda de l'esfera. Al posar en marxa el generador s'observa que les flames es deformen. El seu cos lluminós es comprimeix i és atret per l'esfera.

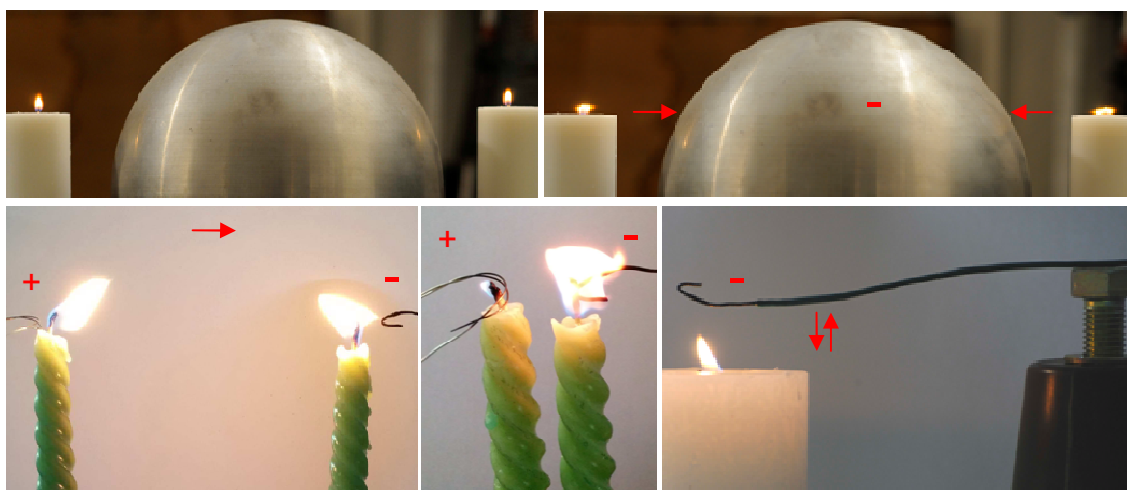


Fig.B.3 (a) Deformació de flames per camp elèctric. (b) Efectes de la polaritat sobre flames sotmeses a un camp elèctric. (c) Extinció d'una flama per camp elèctric. (d) Moviment d'un conductor amb càrrega elèctrica en presència d'una flama. (A.f. Martí, M.).

Els camps elèctrics afecten al comportament i la forma de les flames. Si una flama s'acosta a un camp elèctric negatiu, com és el cas del generat per l'esfera, els electrons són atrets per la flama i es combinen amb els ions positius del seu cos. La càrrega positiva de la flama disminueix. Si s'acosta a un camp elèctric positiu, els electrons de la flama escapen amb major facilitat atrets pel camp elèctric. En conseqüència la flama és sensible a la polaritat dels camps elèctrics a que es sotmesa i això es manifesta en la seva forma i comportament.

A la Fig.B.3 (b), s'ha connectat l'esfera amb càrrega negativa del generador de Van der Graaf i la seva presa amb càrrega positiva, a dos conductors diferents respectivament. El conductor de la dreta està connectat a l'esfera, amb polaritat negativa. El conductor de l'esquerra al born positiu.

Quan s'engega el generador, s'observa que les flames es mouen cap a la dreta. És coherent amb els fenòmens d'atracció i repulsió entre càrregues. L'elèctrode negatiu atreu a la flama. Si s'observa l'espelma de la dreta, sembla com si el conductor agafés la flama per un punt i l'estirés cap a ell. Quan passa el temps l'esfera es va carregant i va augmentant el potencial. En paral·lel s'observa que la flama de l'esquerra va perdent intensitat. Arriba un moment en que s'extingeix. A la Fig.B.3 (c) es mostra aquest efecte (s'han acostat les espelmes per visualitzar-ho millor, però en la disposició de la Fig.B.3 (b) succeeix el mateix).

A la Fig.B.3(d), s'ha acostat només el conductor connectat a l'esfera, amb càrrega negativa, a una flama. No s'ha fixat, sinó que s'ha recolzat lliurement sobre el cap d'un cargol aïllat de terra. A l'augmentar la càrrega de l'esfera amb el temps, el conductor s'accelera i es mou. Es produeix un moviment oscil·latori. Posa de manifest l'aparició de forces degudes a la interacció dels camps de la flama i del conductor. La velocitat del motor del generador de Van der Graaf disminueix. Aquesta situació el sobrecarrega i cal aturar l'experiment.

Si el foc afecta un sistema de AT de corrent altern, aquests efectes són variables amb el canvi de polaritat a cada semiperíode. En el cas de sistemes de AT en corrent continu (com línies de transport a molt alta tensió de grans longituds), els efectes són d'una tipologia constant i venen determinats per la polaritat del sistema.

D'altra banda, una variació simple d'aquest experiment permet comprovar qualitativament la disminució de la tensió disruptiva en presència de foc (amb un equipament més accessible que el s'ha usat durant el cap. 3). Si es connecta una segona esfera al Van der Graaf, al born de càrrega contrària a la de l'esfera principal, es pot generar una descàrrega capacitiva disruptiva entre ambdues esferes. Si es col·loca una espelma al costat de l'esfera gran, s'observarà que cal acostar l'esfera petita a una distància significativament inferior, perquè es produeixi la descàrrega que en condicions normals.

B.3 Registre d'espurnes mitjançant anàlisi d'imatges amb Matlab

Per l'estudi de l'ejecció d'espurnes, pot ser útil desenvolupar un sistema per comptar partícules automàticament, a partir de les seqüències d'imatges obtingudes durant els experiments. Comptar els diferents tipus de partícules és una manera de quantificar la severitat del succés i el seu potencial en relació amb la ignició elèctrica. Són variables rellevants la posició, les dimensions i el color de cada partícula. Comparant la posició de la partícula entre diferents fotogrames, es pot seguir la seva trajectòria. Les espurnes més grans tenen una major habilitat per produir la ignició de combustibles. El seguiment de l'evolució de les seves dimensions, en relació amb el temps de vol, es relaciona amb la seva capacitat per produir la ignició d'una superfície contra la que impactin. El color de l'espurna d'un determinat material, és un indicador de la seva temperatura. La comparació dels colors de les espurnes entre fotogrames, permet estimar l'evolució del seu refredament.

El Dr. Jesús Álvarez, professor del Departament de Màquines i Motors Tèrmics de la ETSEIB (UPC), va suggerir la possibilitat d'adaptar un projecte d'anàlisi d'imatges amb Matlab, desenvolupat des d'aquest departament pel sector de l'automoció, a l'estudi de l'ejecció d'espurnes. Es tracta d'un projecte per detectar obstacles a la carretera, amb la finalitat d'augmentar la seguretat durant la conducció dels vehicles. Un estudi preliminar ha permès comprovar que el codi desenvolupat pot ser adaptat per aplicar-lo a la detecció i registre d'espurnes. A la Fig.B.4 es mostra un exemple a partir d'un dels experiments mostrats al Cap.2.

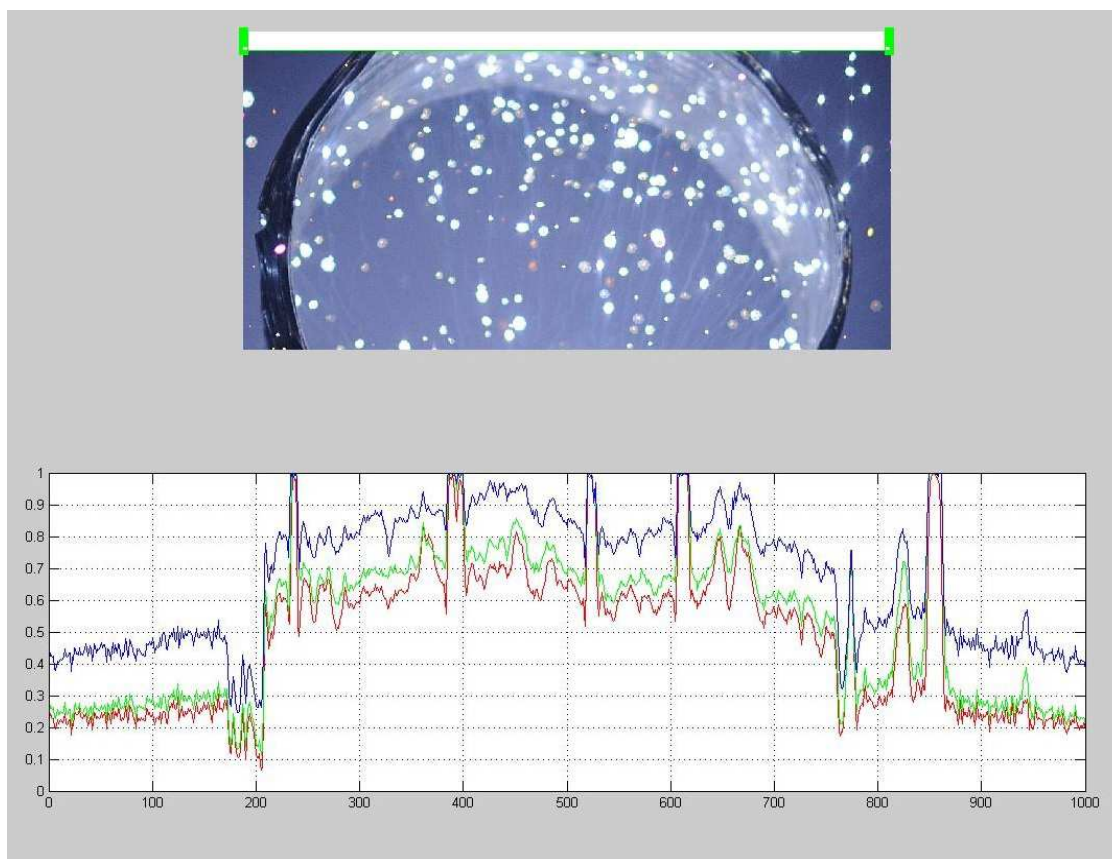


Fig.B.4 Detecció i anàlisi d'espurnes mitjançant Matlab.

El programa escaneja la imatge línia per línia i detecta els píxels associats a les espurnes, pel contrast amb el fons. S'observa que pot ser útil per registrar la posició, l'amplitud i el color de les espurnes d'una imatge de forma automatitzada. Aquest projecte es troba actualment en fase d'estudi i desenvolupament. A la Fig. B.5 és mostra un segon exemple, associat a una altra línia de la imatge mostrada a la Fig.B.4, en la que es detecta una única partícula.

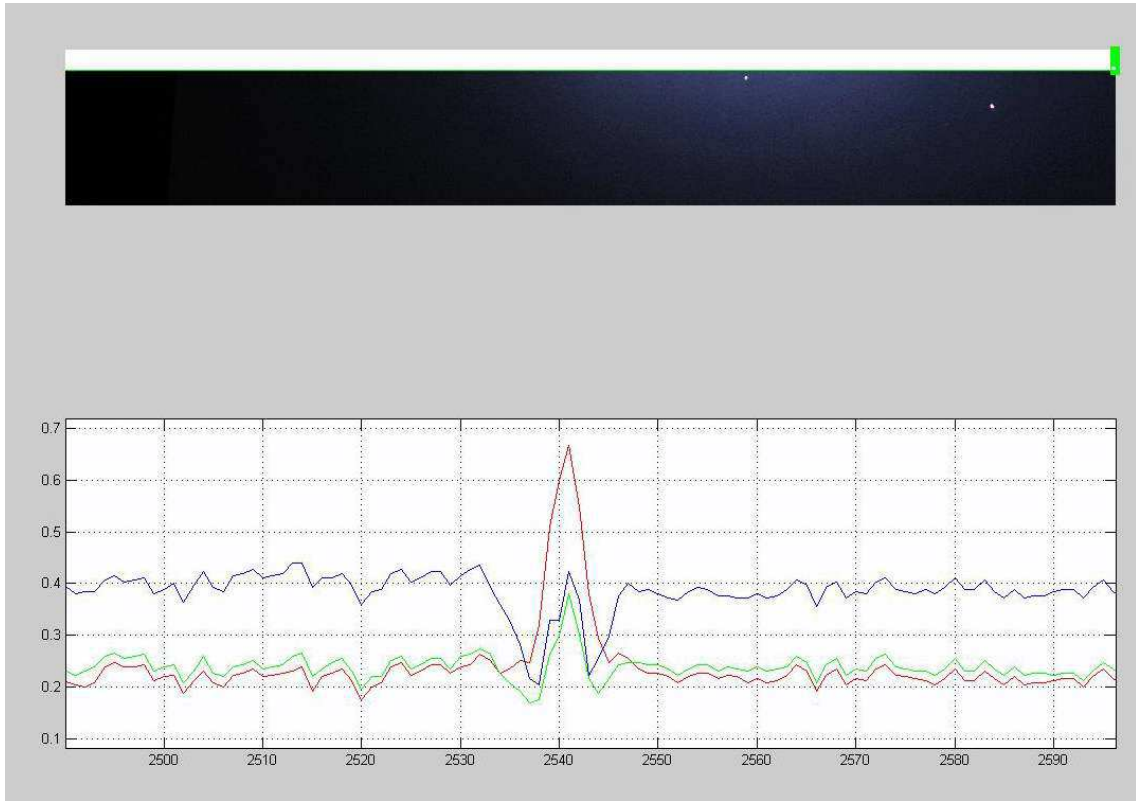


Fig.B.5 Detecció i anàlisi d'una espurna mitjançant Matlab.

Annex C. Treballs constructius

C.1 Aportacions a la plataforma d'assaig de curtcircuit de l'ETSEIB

S'han realitzat alguns dels treballs futurs proposats en el PFC "Instal·lació i posada en servei d'una plataforma d'assaig de potència de 400kVA al laboratori d'alta tensió de l'ETSEIB-UPC" [117], amb la finalitat de millorar les prestacions de la instal·lació. S'ha utilitzat per realitzar alguns dels experiments portats a terme.

La realització dels primers assaigs de curtcircuit, va posar de manifest que la longitud i forma de les connexions influïa significativament en les prestacions de la instal·lació. S'ha portat a terme una reubicació dels contactors i interruptors automàtics, per disminuir la longitud de les connexions. S'ha disminuït la impedància de la instal·lació i s'ha incrementat el corrent de curtcircuit permanent assolible.

Els transformadors de potència generen un pic de corrent de magnetització significatiu durant la seva arrencada (p.e el regulador d'inducció dona lloc a un pic de l'ordre de 1,1kA). Sovint disparen la protecció general del laboratori. S'han registrat aquests corrents i s'ha ajustat i automatitzat una instal·lació de reactàncies limitadores. Permet resoldre aquesta problemàtica amb un cost mínim, atès que les reactàncies estaven disponibles procedents d'una donació de material. Limiten el corrent durant l'arrencada, de forma que no actua l'interruptor automàtic de capçalera. Posteriorment s'aïllen del sistema i la instal·lació opera connectada a la xarxa normalment.

S'ha instal·lat una infraestructura de mesura que permet realitzar registres amb oscil·loscopi en diferents punts de la instal·lació. Consisteix en un conjunt de cadenes de mesura, formades per transformadors de tensió i transformadors d'intensitat, connectats a shunts calibrats amb connectors BNC. Mitjançant sondes coaxials es connecten a l'oscil·loscopi. Permeten registrar tensions i corrents de curtcircuit durant els assajos.

Finalment, s'ha realitzat una anàlisi dels paràmetres elèctrics que caracteritzen la instal·lació a partir de l'estudi d'oscil·logrames. En particular s'ha documentat el comportament en règim transitori del transformador de distribució i el regulador d'inducció en buit i en curtcircuit. El regulador d'inducció és una màquina elèctrica poc usual, de la que existeix poca informació tècnica accessible.

A la Fig.C.1 es mostra algun dels oscil·logrames relatius al funcionament del regulador d'inducció. A l'oscil·lograma (a) es mostra el seu transitori d'arrencada. Es pot observar que es produeixen elevats pics de corrent magnetitzant durant el subtransitori del primer període. Posteriorment s'esmoreixen notablement, fins arribar al regim permanent en el cinquè període aproximadament. El corrent de buit al primari del regulador presenta la forma típica d'una senoide distorsionada per components harmòniques degudes a inductàncies saturables.

A l'oscil·lograma (b) es mostra el comportament del regulador davant d'un curtcircuit, de l'ordre de 350ms de duració. La tensió eficaç del secundari s'ha ajustat a un valor de 70V. S'observa que es produeix un pic de corrent màxim asimètric durant el subtransitori. La situació més desfavorable en el càlcul de corrents de curtcircuit, és quan el defecte s'inicia en el pas per zero de la tensió, perquè dona lloc al màxim valor de la component asimètrica. Després el corrent s'esmoreeix de forma transitòria fins que s'assoleix el règim permanent. Durant el curtcircuit es produeix una caiguda de tensió en el secundari del transformador. Quan deixa de circular corrent de curtcircuit, es produeix un transitori fins que la tensió recupera el seu nivell habitual.

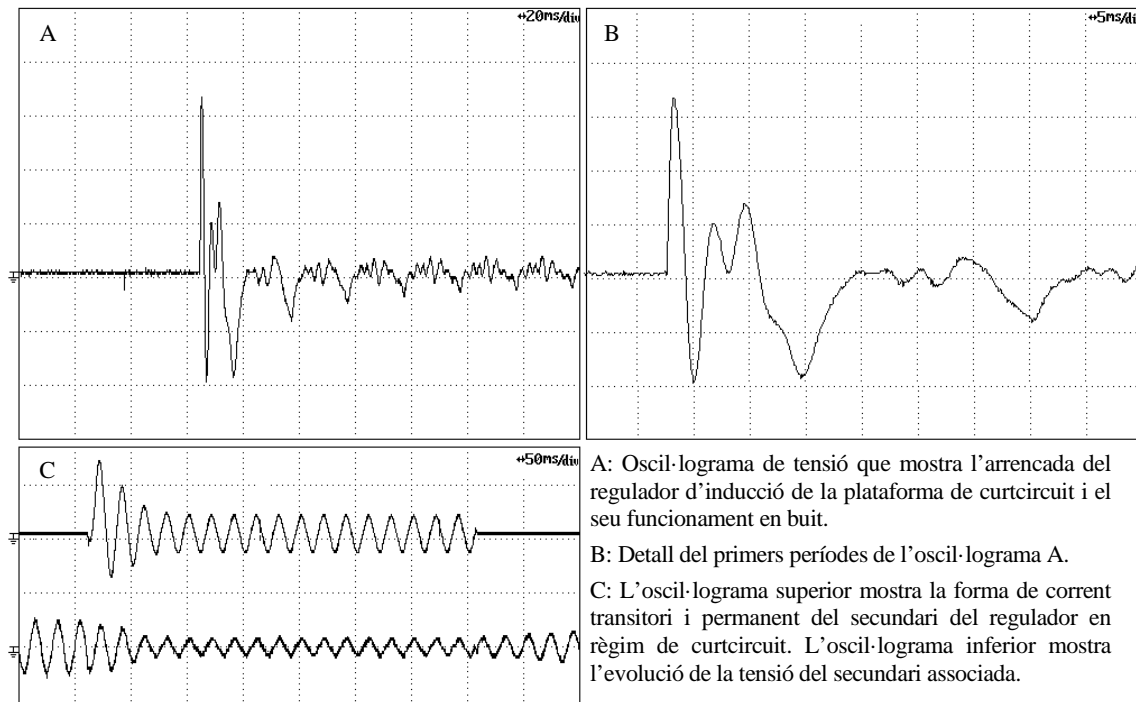


Fig.C.1 Oscil·logrames de tensió i corrent relatius al funcionament d'un regulador d'inducció.

C.2 Construcció d'un explosor elèctric d'alta tensió refrigerat a partir del tub de Thiele

El tub de Thiele és un estri de laboratori de química fet de vidre, similar a un tub d'assaig amb un agafador. S'utilitza habitualment per determinar la temperatura de fusió i ebullició d'una substància [128]. A l'escalfar el seu braç, la seva geometria facilita una circulació per convecció del líquid que conté. Per realitzar experiments de descàrregues disruptives en presència de foc, es va veure que seria útil disposar d'un explosor refrigerat, que limités l'increment de la temperatura dels elèctrodes durant proves iteratives. Això va conduir a construir un explosor inspirat en el tub de Thiele.

A la Fig.C.2, es mostren dos “tubs de Thiele” de coure. Per fabricar-los s'ha usat tub de coure de 54mm i 10mm de diàmetre i una planxa de coure de poc gruix. Aquests tubs estan normalitzats i s'utilitzen normalment per realitzar instal·lacions d'aigua. L'assemblatge i les seves dimensions es mostra a la figura. Per unir els components s'utilitza un equip de soldadura d'estany-plata. Cada assemblatge s'instal·la sobre un aïllador. S'omplen els tubs d'aigua. A l'apropar-los resulta un explosor refrigerat per aigua. Eventualment es podria refrigerar també amb nitrogen líquid. Utilitzant aigua com a refrigerant, permet realitzar descàrregues contínues en presència de foc durant minuts. La geometria dels braços és adequada per realitzar descàrregues disruptives entre ells i les flames poden introduir-se des de diferents direccions.

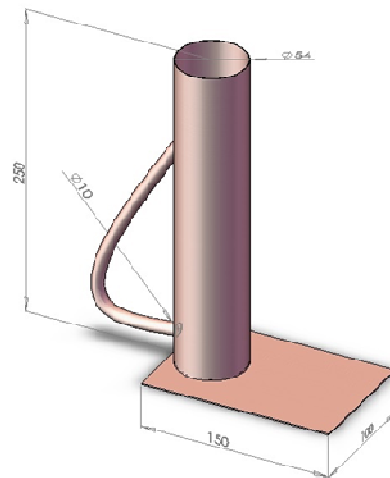


Fig.C.2 Explosor basat en el tub de Thiele. (A.f. Bosch, R.; Martí, M.).

Annex D. Altres hipòtesis i indicis observats

D.1. Anàlisi d'un sinistre amb hipòtesi d'ignició per descàrrega per pistes carbonitzades

En una botiga en la que s'emmagatzemaven productes tèxtils, es va produir un incendi que va ocasionar grans pèrdues materials. Estava ubicada al barri de Gràcia de Barcelona, en un carrer molt humit atès que mai hi toca el sol. El sinistre es va produir just el primer dia en que s'obria el comerç després d'uns dies de tancament per vacances de Nadal. Durant aquest període s'havia desconnectat la instal·lació interior del local. Uns dies abans del tancament, al carrer s'havien realitzat uns treballs de manteniment de la xarxa de distribució. Van comportar diversos talls de subministrament. El dia de l'obertura, la dependent connecta la instal·lació, encén els llums i va a llençar les escombraries del darrer dia d'activitat. Quan torna, la botiga es troba en flames.

Durant la investigació del sinistre⁵⁴ es va localitzar el seu origen en una canal que contenia cables elèctrics. Al seu interior, es van trobar indicis de curtcircuit entre els conductors de fase i neutre d'un cable multipolar de 3x1,5mm², amb conductors de coure i aïllament de PVC, que formava part d'un circuit monofàsic de la instal·lació elèctrica del local. Es va observar que els fils dels conductors de fase i neutre havien quedat soldats entre ells. Indicava un augment de la temperatura per sobre de la temperatura de fusió del coure. Es va definir com a probable font d'ignició de l'incendi un curtcircuit amb arc.

Tot i que els aïllaments dels conductors en la zona del curtcircuit van quedar destruïts, es van poder obtenir mostres intactes del cable procedents d'una zona que no va quedar afectada ni pel defecte elèctric ni per l'incendi.

Un posterior anàlisi dels aïllaments dels conductors de fase i neutre, realitzat amb microscopi electrònic i EDX, va posar de manifest l'existència de porus i microesquerdes en sentit longitudinal. També hi havia presència de grumolls i inclusions de carbonat càlcic d'entre 10 i 30 micres. El carbonat càlcic és un compost utilitzat en la fabricació d'aïllaments de cables elèctrics a base de PVC, per abaratir costos i millorar el seu comportament davant les flames, entre d'altres factors. No obstant, en aquest cas existien càrregues excessives d'aquest component, una granulometria inadequada i microesquerdes en el sentit de l'extrusió del cable. Realitzant un tall transversal es van poder observar punts dielèctricament crítics en els conductors de fase i neutre. En canvi, el conductor de protecció i la coberta exterior no presentaven cap defecte observable (v. Fig.D.1).

Una hipòtesi per explicar l'inici del curtcircuit és que dos defectes d'aïllament quedessin alineats, facilitant l'aparició d'un camí conductor entre fase i neutre a través seu. Una possibilitat és que aquest camí fos generat per un fenomen de descàrrega elèctrica per pistes conductores carbonitzades. La humitat present en el local podria haver estat un factor de risc, tot i que al ser un multiconductor la penetració de la humitat es més difícil.

⁵⁴ Portada a terme per a Crawford&Company pel Dr. Ricard Bosch (v. [129])

Com s'ha senyalat al cap.1 (v.1.3.2.5), els aïllaments de PVC són susceptibles a una forma singular d'aquest fenomen: la humitat autoinduida. Quan l'aïllament se sotmet a una temperatura elevada (de l'ordre d'un mínim de 110°C), es pot comprovar experimentalment que el carbonat càlcic reacciona amb el PVC formant clorur de calci (CaCl_2). Com el clorur de calci és un compost altament higroscòpic pot crear una capa d'humitat sobre les superfícies aïllants. Si una font de calor produeix aquesta reacció i la humitat es combina amb els contaminants deguts a una certa degradació tèrmica de l'aïllament, es pot generar un camí conductor que faciliti l'aparició de descàrregues elèctriques. En aquest cas, la calor que iniciés el procés podria haver estat aportada per un sobreescalfament a causa d'un mal contacte en les regletes de connexió.

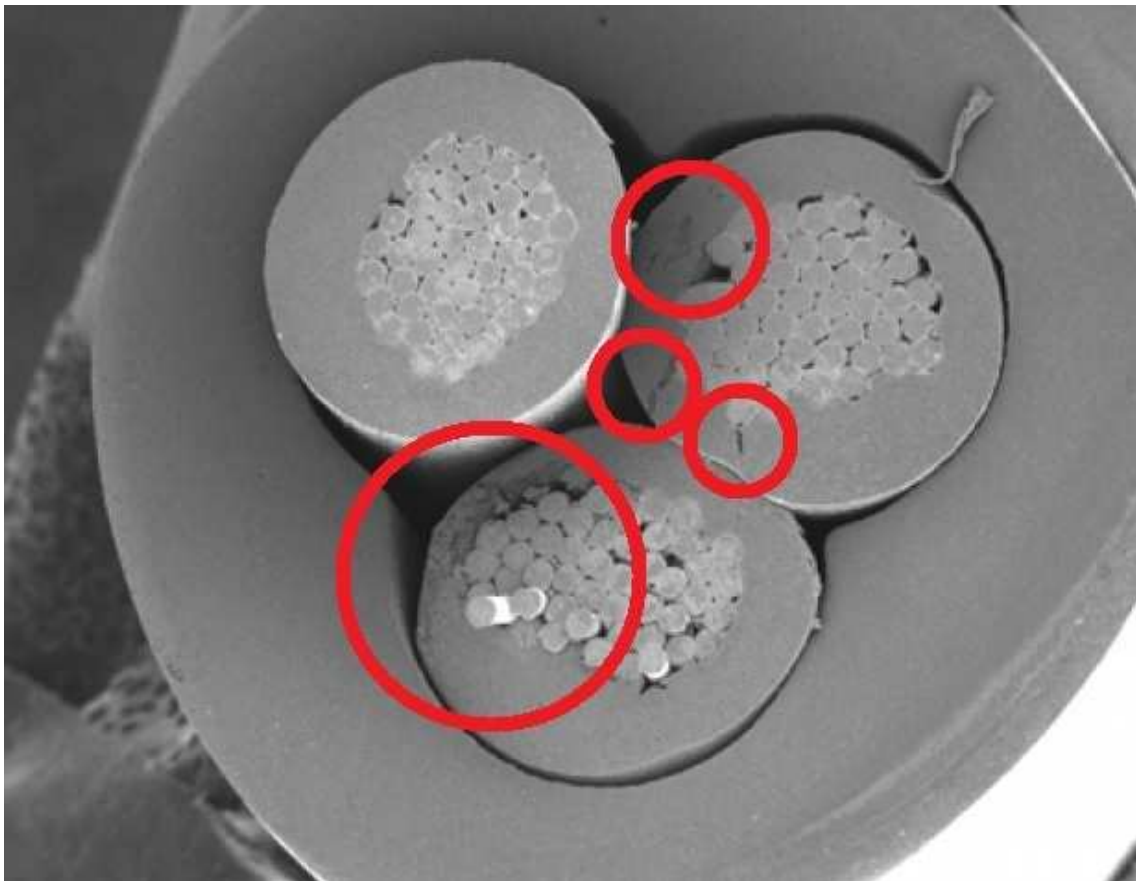


Fig.D.1 Esquerdes en l'aïllament dels conductors de fase i neutre d'un sinistre. (A.f. Bosch, R., Marsal, M.).

Una singularitat del cas radica en que el fet que el conductor tingués un excés de càrrega de carbonat càlcic, podria haver afavorit la generació de clorur de calci en relació amb un cas convencional. Això hauria pogut donar lloc a una major atracció d'humitat autoinduida sobre les superfícies defectuoses.

La existència d'una gran quantitat de balastos inductius de la il·luminació del local, els quals generen sobretensions, podrien haver accelerat el procés. Els treballs de manteniment de la xarxa de distribució del carrer, van comportar talls de subministrament elèctric. Acostumen a implicar sobretensions transitòries de maniobra que també haurien pogut influir.

Una altra singularitat és l'existència de microesquerdes en l'aïllament, les quals podrien haver facilitat la penetració de la humitat, les descàrregues i la generació d'un camí conductor cap a l'interior. En una zona crítica on les microesquerdes del conductor de fase i neutre coincidissin, es podria haver establert un curtcircuit amb arc amb suficient energia com per produir la ignició del cable i causar el sinistre.

Una afortunada cadena de casualitats va permetre descobrir que l'instal·lador no havia obtingut el cable a partir dels proveïdors habituals, sinó d'unes restes d'estoc que es trobaven en el magatzem del fabricant. L'instal·lador no va ser conscient que en realitat aquests rulls estaven emmagatzemats esperant per ser reciclats, atès que havien estat rebutjats pels controls de qualitat. No obstant, per un cúmul de circumstàncies van acabar sent instal·lats en el local del sinistre. Aquesta possibilitat, tot i ser poc comuna, pot ser tinguda en compte a l'hora de valorar les descàrregues per camins conductors carbonitzats sobre PVC amb humitat autoinduïda, com a font d'ignició d'un incendi.

D.2 Indicis de conducció resistiva a través d'animals electrocutats

La conducció de corrent per conductors no previstos, pot produir sobreescalfaments que condueixin a la ignició elèctrica. A partir de sinistres reals analitzats en el Laboratori de Màquines Elèctriques i Alta Tensió de l'ETSEIB (UPC), s'ha observat que alguns animals, com els llangardaixos, tendeixen a electrocutar-se entre els embarrats dels quadres elèctrics. Després, els seus cadàvers romanen entre les barres com un pont conductor entre elles. Acostuma a ser una conducció de tipus resistiu, seguida de períodes de repòs aparentment aleatoris. Normalment solen assecar-se, quedant deshidratats. Altres, com les rates, són molt propensos a menjar aïllaments. La ignició d'aquests animals pot ser un factor de risc.

S'ha realitzat algun estudi experimental sobre la conducció en animals morts, en relació amb el risc d'ignició elèctrica. En particular, s'han fet proves a una tensió de 400V amb ales de pollastre. L'objectiu era analitzar la possibilitat que un animal produeixi un incendi al menjar-se l'aïllament dels conductors o entrar en contacte amb els embarrats d'un quadre elèctric industrial. S'ha observat que els ossos tenen una gran influència en la evolució del fenomen. Sembla que aturen l'electroerosió de la matèria orgànica. És un camp encara poc explorat.

D.3 Rastres minerals en un conductor d'una línia aèria de AT afectat per un arc

A la Fig.D.2, es mostra un tram d'una empiuladura de fils d'aliatge d'alumini trenats sense ànima d'acer, que formava part d'una línia aèria de AT. L'aliatge de Al, Si i Mg millora les propietats mecàniques dels conductors en relació amb quan es fabriquen amb Al⁵⁵ [130]. Es va produir una descàrrega elèctrica i l'empiuladura es va retirar del servei.

La descàrrega va afectar tota la longitud de l'empiuladura. S'aprecien rastres d'oxidació superficial i degradació tèrmica de l'aliatge, ocasionades per l'increment de temperatura produït per l'arc. No

⁵⁵ Permet prescindir de l'ànima d'acer utilitzada habitualment en les filasses de Al més pur.

obstant, s'observa que només va afectar mig tronc de la filassa (es mostra un gir de 180° de la mateixa). Una ampliació mitjançant lupa electrònica, permet observar grans de sorra de color gris fosc i alguns grans de sorra silícia (amb longituds de l'ordre de 0,2-1mm).

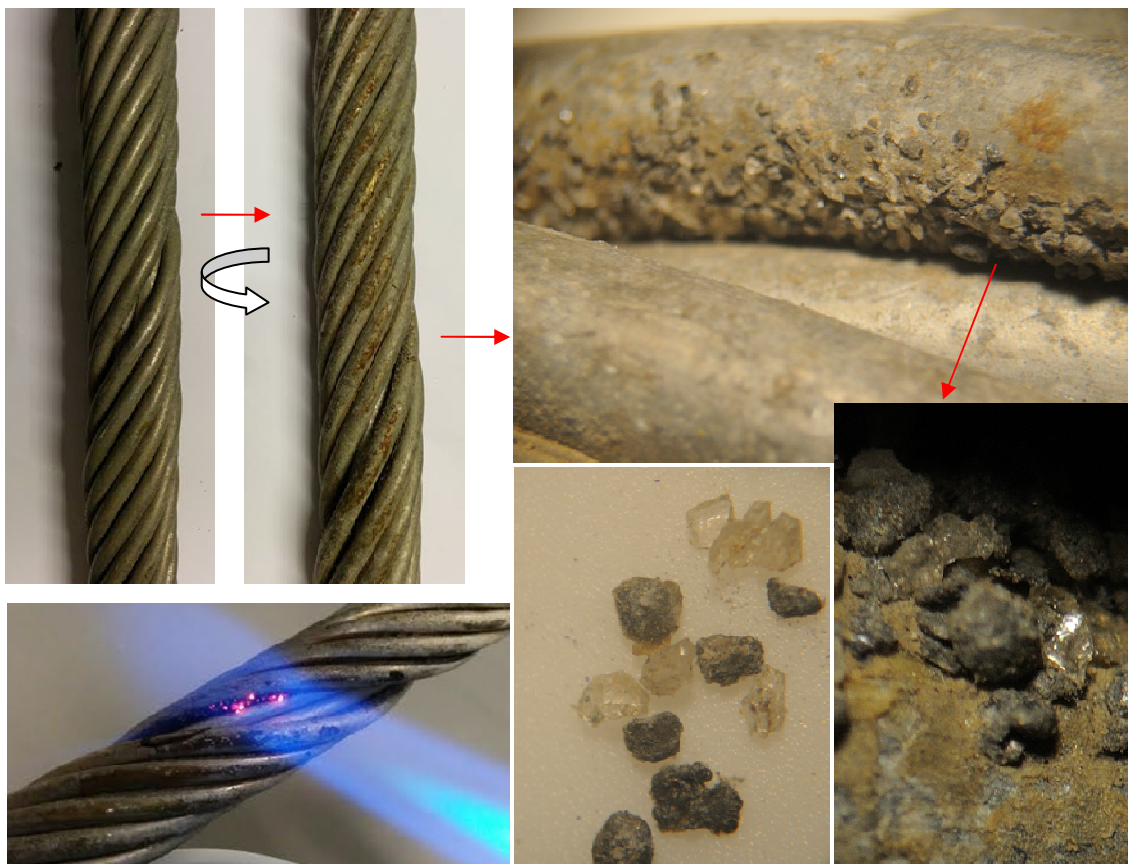


Fig.D.2 Partícules adherides a una empiuladura de Al sotmesa a l'acció de l'arc. (A.f. Martí, M.).

Les partícules es troben fortament adherides entre els fils de l'empuladura. Cal usar una rasqueta per aconseguir separar-les del conductor. Les línies aèries actuen com a precipitadors electrostàtics, que poden atreure petites partícules i sorra transportades pel vent. Per exemple, sorra silícia de baixa granulometria procedent de les platges. Una peculiaritat que s'observa és que si s'acosta una flama procedent d'un cremador de gas, immediatament es produeix un fenomen de luminescència de les partícules. Si es retira la flama s'apaguen immediatament.

Les elevades temperatures de l'arc, propicien que les partícules superin la temperatura de fusió de la filassa i s'adhereixin a la seva superfície. En cas d'incendi sota una línia aèria, bona part de les partícules contingudes en el fum també poden ser atretes i quedar adherides als conductors. No obstant, la seva distribució sobre la superfície del conductor serà heterogènia. Aquest rastre de l'arc pot senyalar el camí que ha seguit després d'un sinistre.